

**OXIDACIÓN CÍCLICA DE ACERO ASTM A53 GRADO B CON ROCIADO TÉRMICO
POR ARCO DE Cr-Ni A TEMPERATURAS DE 500 A 600 GRADOS CELSIUS**

JHON HARVEY BOTERO MONTOYA

Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

JOSE LUDDEY MARULANDA ARÉVALO

Ingeniero Metalúrgico Ph.D

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA, RISARALDA. MAYO 2017

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Pereira, Risaralda. Mayo de 2017

AGRADECIMIENTOS

A JOSE LUDDEY MARULANDA ARÉVALO Ing. Metalúrgico. Ph.D en corrosión en alta temperatura, por su orientación durante el trabajo de grado.

Al Ing. Mecánico Diego Pérez investigador por su colaboración, apoyo y asesoría durante todo el desarrollo del proyecto de grado.

A la Universidad Tecnológica de Pereira, por financiar el desarrollo del proyecto, además de formarme como una persona íntegra y prepararme para la vida.

A la Tecno-Academia del SENA, por facilitar los instrumentos y equipos para los análisis de microscopía electrónica de barrido SEM.

A la Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia, por su colaboración con las pruebas de difracción de rayos X.

A la Rectificadora GL MOTORS por la aplicación del rociado térmico por arco a las muestras del material.

Al grupo de investigación en materiales avanzados GIMAV y al CECEND, por facilitar las instalaciones y equipos del laboratorio de metalografía donde se llevó a cabo el desarrollo de la prueba.

A mi familia por darme la oportunidad de pertenecer a esta gran Universidad, contribuyendo al mejoramiento continuo de mi vida.

A mi madre Amparo Montoya por su amor, apoyo, confianza y preocupación constante

A mi padre Saul Botero por ser consejero, por su gran apoyo y ejemplo a seguir

A mi hermano Cristian Botero Montoya por su atención y confianza en el proceso

A mi familia por su gran comprensión, paciencia y ayuda durante toda la carrera

A mis amigos y colegas “los pistones” que me acogieron como una gran familia

A mi novia Juanita M. Giraldo por su confianza y colaboración incondicional.

JHON HARVEY BOTERO MONTOYA

CONTENIDO

Resumen

Introducción

1. Título
2. Objetivos
 - 2.1 Objetivo general
 - 2.2 Objetivos específicos
3. Metodología y experimentos
 - 3.1 Revisión bibliográfica
 - 3.2 Construcción y preparación de las probetas
 - 3.2.1 Preparación
 - 3.2.2 Rociado térmico por arco
 - 3.2.3 Preparación del horno y del mecanismo
 - 3.3 Prueba de oxidación cíclica
 - 3.3.1 Censado inicial de masas
 - 3.3.1.1 Masas a 600°C y 0 ciclos
 - 3.3.1.2 Masas a 500°C y 0 ciclos
 - 3.3.2 Cronogramas de Extracciones y tomas de masas
 - 3.3.3 Inicio de la prueba
 - 3.3.4 Almacenamiento de Muestras
 - 3.3.5 Finalización de la prueba de oxidación cíclica
 - 3.4 Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido *SEM*
 - 3.4.1 Preparación de Muestras para *SEM*
 - 3.4.2 Preparación metalográfica
4. Análisis de resultados
 - 4.1 Análisis estadístico
 - 4.1.1 Análisis estadístico de masas a 600 °C
 - 4.1.2 Análisis estadístico de masas a 500 °C

- 4.1.3 Comparación de pruebas a 600 °C y 500 °C
 - 4.2 Análisis por microscopia electrónica de barrido *SEM*
 - 4.2.1 Muestras sometidas a 600 °C
 - 4.2.1.1 Probetas sometidas a rociado térmico por arco con Cr-Ni
 - 4.2.1.2 Probetas sin recubrimiento a 600 °C
 - 4.3 Microscopia óptica a probetas sometidas a 500 °C
 - 4.4 Difracción de rayos X *DRX*
 - 4.5 Resultados generales
- 5. Conclusiones, aportes y recomendaciones
 - 5.1 Conclusiones
 - 5.2 Recomendaciones
- 6. Bibliografía

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Varilla inicial (muestra)	14
Figura 2. Fresado de las varillas	14
Figura 3: A, tamaño final de probetas. B, rociado térmico en GL MOTORS	15
Figura 4. Mecanismo de pruebas de oxidación cíclica	15
Figura 5. Balanza y toma de masas iniciales	16
Figura 6. A. desecador, B. colocación de probetas.	21
Figura 7: Probeta 1, 100 ciclos, 600°C	33

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Curvas de ciclos vs masas de probetas recubiertas a 600 °C	24
Ilustración 2: Curvas de ciclos vs masas de probetas sin recubrimiento a 600 °C	24
Ilustración 3: primeros 100 ciclos de probetas recubiertas a 600 °c	25
Ilustración 4: primeros 100 ciclos de probetas sin recubrimiento a 600 °c	26
Ilustración 5: 100 a 500 ciclos de probetas recubiertas a 600 °c	27
Ilustración 6: 100 a 500 ciclos de probetas sin recubrimiento a 600 °c	27
Ilustración 7: Probetas recubiertas a 500°C	28
Ilustración 8: Probetas sin recubrimiento a 500°C	29
Ilustración 9: porcentajes de masa ganada a probetas recubiertas a 600°C	30
Ilustración 10: porcentajes de masa ganada a probetas recubiertas a 500°C	30
Ilustración 11: porcentajes de masa ganada a probetas sin recubrimiento a 600°C	31
Ilustración 12: porcentajes de masa ganada a probetas sin recubrimiento a 500°C	31
Ilustración 20: Probeta 14, 50 ciclos, 600°C	43
Ilustración 21: probeta 16, 500 ciclos, 600°C	44
Ilustración 23: Probeta 4, 500 Ciclos, 500°C	46
Ilustración 24: Probeta 9, 500 Ciclos, 500°C	47
Ilustración 25: Probeta 10, 220 Ciclos, 500°C	48

Ilustración 26: Probeta 11, 100 Ciclos, 500°c	48
Ilustración 27: Probeta 12, 25 Ciclos, 500°c	49
Ilustración 28: Informe DRX a probeta recubierta sin oxidación	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1- Comparativa de métodos de rociado térmico	11
Tabla 2. Masas iniciales para 600 °C	17
Tabla 3. Masas iniciales para 500 °C	17
Tabla 4. Extracciones a 600 °C	18
Tabla 5. Extracciones a 500 °C	18
Tabla 6. Masas a 600 °C	19
Tabla 7. Masas para 500°C	20
Tabla 8. Emparejamiento de muestras a 600°C	22
Tabla 9. Emparejamiento de muestras a 500°C	22
Tabla 10: Espesores de los diferentes materiales observados a 600°c	42
Tabla 11: Espesores de los diferentes materiales observados a 500°c	47
Tabla 12. Resultados de composición de DRX	51

RESUMEN

En primer lugar se realizó una investigación bibliográfica, en la cual se documentó acerca del proceso de oxidación cíclica a altas temperaturas, rociado térmico por arco, sobre el acero ASTM A53 y sobre corrosión. Posterior a esto se identificó el mecanismo con el cual se realizó la prueba y se hace un estudio de su manual y de cómo es su funcionamiento y preparación previa a la prueba; luego de ser finalizada la prueba para las dos temperaturas, se prepararon metalográficamente las probetas para someterlas a los respectivos ensayos de composición.

En este trabajo se describen de forma detallada los pasos llevados a cabo para la prueba de oxidación cíclica del acero ASTM A53 Grado B en su presentación normal y también como se comportaría frente a un recubrimiento de Cromo – Níquel aplicado con el método de rociado térmico por arco. Esta prueba se llevó a cabo en el *mecanismo para pruebas de oxidación cíclica*, ubicado en el laboratorio de metalografía de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira; posteriormente se realizaron y analizaron resultados de pruebas hechas a estas probetas como lo son la *microscopia electrónica de barrido SEM* y la *difracción de rayos X DRX*.

Este proyecto llevó consigo el desarrollo de múltiples tareas para pasar de las muestras originales a los análisis detallados de los resultados obtenidos en las pruebas, se realizaron análisis estadísticos de la ganancia y pérdidas de masas a lo largo de la prueba, los diferentes tipos de óxidos y sus respectivos espesores ganados a lo largo del ensayo de oxidación cíclica entre otros.

INTRODUCCIÓN

A través de los años de evolución del ser humano, se han requerido herramientas y máquinas que mejoren la vida cotidiana en las poblaciones y asentamientos creados para vivir. Para garantizar la prolongación de vida útil, aumentar la eficiencia y reducir el costo de producción y mantenimiento, las superficies se empezaron a mejorar mediante el uso de diferentes tipos de recubrimientos de manera experimental. [1]

Los recubrimientos hechos con rociado térmico pueden ser el medio más rentable para proteger la superficie del sustrato contra el desgaste y la corrosión. Esta técnica comprende el calentamiento del material, en forma de polvo o alambre, hasta obtener una forma fundida o semi-fundida, la cual se transporta mediante una corriente de gas o de aire comprimido para su depósito, creando una estructura en la superficie de un determinado sustrato.

Los recubrimientos rociados térmicamente son formados por depósitos de sucesivas capas de material particulado en estado líquido del orden de millones de partículas por cm^2/s , los cuales se aplanan y solidifican resultando en una macro estructura conocida como lenticular o laminar. A lo que inciden sobre el sustrato, las gotas fundidas en forma de lentes se enfrían a velocidades extremadamente altas y se anclan mecánicamente en las irregularidades de la superficie. La estructura típica de los revestimientos por rociado térmico es la unión cohesiva consolidada de láminas del material rociado, entremezclada con inclusiones de óxidos, micro grietas, partículas solidas y porosidad. [2]

La tecnología de los recubrimientos por rociado térmico está siendo vista por la comunidad ingenieril como una solución a los problemas generados por desgaste, corrosión a altas temperaturas y corrosión acuosa, regulación térmica entre otros. La diversidad de opciones con relación al empleo de materiales y la competitividad industrial conllevan a una compleja situación, donde se deben unir características de desempeño con factores de proceso y costo, en la elección de los materiales más adecuados en una aplicación específica. [3]

Los materiales tradicionales, están sufriendo alteraciones, mientras los nuevos materiales como los polímeros y los materiales compuestos, se están adecuando al uso, compitiendo con los demás. La utilización de revestimientos sobre componentes o productos metálicos, conocida

como ingeniería de superficie, viene creciendo drásticamente debido, principalmente, a los altos costos de los materiales avanzados y los crecientes requerimientos de ciclo de vida de los sistemas de alto desempeño. Teniendo en cuenta la variedad de tipos de revestimientos y la complejidad de los factores ambientales, puede usarse un material económicamente apropiado como sustrato y aplicar un revestimiento adecuado para protegerlo del ambiente exterior, donde se empleará el referido material. Esta lógica ha llevado al rápido desarrollo de la tecnología de revestimiento para uso como parte integrante del proyecto en diversas aplicaciones de ingeniería. [4]

El rociado térmico por arco tiene el índice más alto de deposición entre los diferentes procesos de su tipo y se puede utilizar para rociar grandes superficies y gran cantidad de componentes de una cadena productiva o en operaciones repetitivas. Los usos más típicos de este proceso son:

- El rociado térmico de las cubiertas del componente electrónico con cobre, zinc y aluminio proporcionan un blindaje contra la interferencia electromagnética en capas conductoras.
- Rociado con zinc y aluminio de grandes estructuras como puentes calderas e instalaciones en zonas costeras para dar protección contra la corrosión.
- Recuperación de los componentes de ingeniería tales como cojinetes y ejes con aleaciones de acero y bronce.

A continuación se muestra en la tabla 1, una comparativa entre los diferentes tipos de rociado térmico resaltando algunas propiedades importantes de cada uno. [5,6]

	Velocidad de la partícula (m/s)	Adherencia (Mpa)	Contenido de óxidos (en metales) (%)	Porosidad (%)	Velocidad de la deposición (kg/h)	Espesor típico del depósito (mm)
Llama-Polvo	40-80	10-20	10-15	10-15	1-10	0,2-10
Llama-Hilo	70-150	15-30	5-10	5-10	5-20	0,2-10
HVOF	400-1000	>70	1-2	1-2	1-5	0,2-2
Detonación	600-800	>70	1-2	1-2	1-5	0,1-1
Arco	100-200	25-40	10-20	5-10	6-60	0,2-10
Plasma	100-300	25-70	1-3	5-10	1-5	0,2-2

Tabla 1- Comparativa de métodos de rociado térmico

1. TÍTULO

**OXIDACIÓN CÍCLICA DE ACERO ASTM A53 GRADO B CON ROCIADO TÉRMICO
POR ARCO DE Cr-Ni A TEMPERATURAS DE 500 A 600 GRADOS CELSIUS**

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento en oxidación cíclica de acero ASTM A53 grado B utilizado típicamente en la construcción de calderas, el cual fue revestido con Cr-Ni mediante rociado térmico por arco.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos de oxidación cíclica a probetas de acero ASTM A53 grado B para analizar su comportamiento al ser sometidos a una temperatura de 500 y 600 grados Celsius.
- Realizar ensayos de oxidación cíclica a probetas de acero ASTM A5 grado B recubiertas con una capa de Cr-Ni mediante el proceso de rociado térmico por arco para analizar su comportamiento al ser sometidos a temperaturas de 500 y 600 grados Celsius.
- Establecer la influencia de la temperatura y el tiempo de exposición en la velocidad de oxidación del acero sometido a rociado térmico y comparar con las muestras originales.
- Analizar la información obtenida con ensayos SEM/DRX y concluir el comportamiento presentado por el recubrimiento de Cr-Ni en el acero sometido al proceso de oxidación cíclica.

3. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS

Para lograr edificar y consolidar el proyecto fue necesario seguir una planeación del mismo, una guía de pasos consecutivos que se inició con una revisión de documentos, la cual brindó luces de cómo realizar un ensayo de oxidación cíclica para aclarar el procedimiento que se realizaría. Este proyecto generalmente se basó en seis etapas las cuales se presenta a continuación con la información detallada de cada una de estas y sus respectivas actividades asociadas.

3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizaron lecturas de diferentes tipos de documentos, artículos y archivos en la red en la cual se obtuvo conocimiento de los procedimientos a seguir para evaluar las probetas mediante las pruebas de oxidación cíclica como también el manual de manejo del mecanismo para garantizar una optima manipulación de este. Además se realizaron consultas sobre las diferentes técnicas de caracterización de materiales como SEM y DRX.

3.2. CONSTRUCCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Previo al inicio de la prueba de oxidación cíclica se deben hacer los preparativos de las probetas para garantizar una uniformidad en sus geometrías y masas.

3.2.1. PREPARACIÓN

Se recibió una muestra de tubería de caldera la cual tenía un espesor original de 1 cm y un ancho de corte de 1 cm. Se hizo un corte transversal y se extendió la tubería hasta obtener una varilla lo mas plana posible; como se muestra en la fig. 1, a partir del tramo de tubería inicial, se produjo la forma alargada de la muestra, para posteriormente rectificar sus caras garantizando así una superficie plana.



Figura 1. Varilla inicial (muestra)

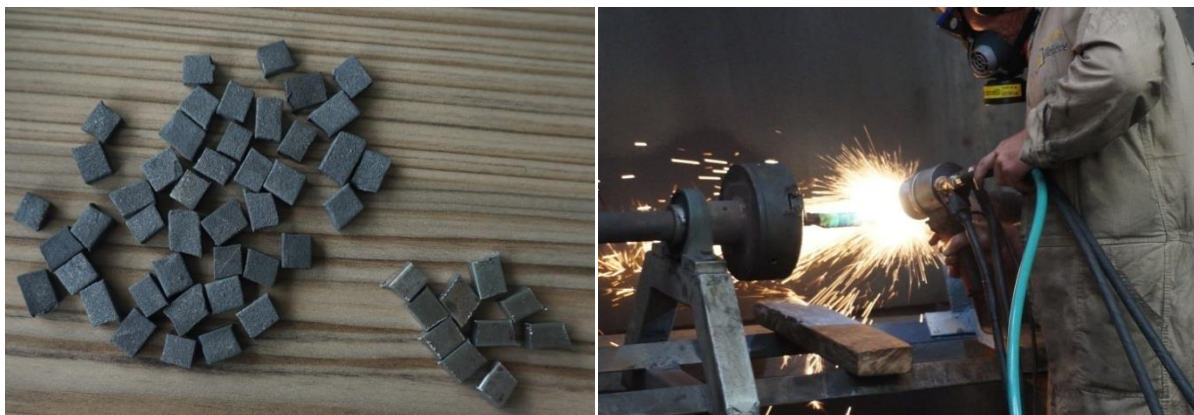
Para garantizar que la superficie este lo mas lisa posible se maquinó con la fresadora universal acoplando una fresa bailarina de $\frac{1}{2}$ pulgada (Fig. 2) obteniendo finalmente una sección transversal de 4 mm x 10 mm de aceptable uniformidad.



Figura 2. Fresado de las varillas

3.2.2 ROCIADO TÉRMICO POR ARCO

Posteriormente se cortaron muestras cada 7 mm para así obtener un total de 28 probetas (ver Fig. 3.a) de las cuales 17 se sometieron a recubrimiento con cromo-niquel por el método de rociado térmico por arco como se muestra en la Figura 3.b.



A
Figura 3: A, tamaño final de probetas. B, rociado térmico en GL MOTORS

3.2.3 PREPARACIÓN DEL HORNO Y EL MECANISMO

Por otro lado se revisó el horno, se verificó la correcta instalación y operación del mecanismo mostrado en la Fig. 4 y se le aplicó cemento refractario a la canastilla la cual alojará las probetas durante la oxidación cíclica, posteriormente se calibró el actuador neumático para que no tuviese movimientos bruscos, se ajustó la temperatura de operación del horno (500°C y 600°C), se ajustaron las presiones de operación y finalmente se configuraron ciclos de 60 minutos, de los cuales 50 minutos serán en horno y 10 minutos fuera de este. [7]



Figura 4. Mecanismo de pruebas de oxidación cíclica

3.3 PRUEBA DE OXIDACIÓN CÍCLICA

Previo a esta prueba se numeraron las probetas al azar así: de la 1 a la 11 las probetas recubiertas y de la 12 a la 16 las probetas sin recubrimiento para ambas temperaturas.

3.3.1 CENSADO INICIAL DE MASAS

Previo al inicio de la prueba se debió tomar registro de la masa de cada probeta y se numeraron empezando con las probetas recubiertas y finalizando con las originales, las masas se tomaron con una balanza VIBRA de resolución 0.0001 g como se ilustra en la Fig. 5.



Figura 5. Balanza y toma de masas iniciales

3.3.1.1 MASAS A 600 °C Y 0 CICLOS

Tabla 2. Masas iniciales para 600 °C

Probeta	Material	Masa a 0 ciclos (g)
1	Cr-Ni	3,3237
2	Cr-Ni	3,4684
3	Cr-Ni	2,5308
4	Cr-Ni	2,7858
5	Cr-Ni	2,4964
6	Cr-Ni	2,5719
7	Cr-Ni	3,7707
8	Cr-Ni	3,2895
9	Cr-Ni	3,0008
10	Cr-Ni	3,1164
11	Cr-Ni	2,8954
12	A53	3,5188
13	A53	3,5944
14	A53	3,2667
15	A53	2,7057
16	A53	3,12

3.3.1.2 MASAS A 500 °C Y 0 CICLOS.

Tabla 3. Masas iniciales para 500 °C

Probeta	Material	Masa a 0 ciclos (g)
1	Cr-Ni	2,7774
2	Cr-Ni	2,9797
3	Cr-Ni	3,1366
4	Cr-Ni	2,9228
5	Cr-Ni	3,9474
6	Cr-Ni	2,7279
7	A53	2,7101
8	A53	3,2744
9	A53	2,8289
10	A53	3,0069
11	A53	3,1079
12	A53	3,5485

3.3.2 CRONOGRAMAS DE EXTRACCIONES Y TOMA DE MASAS.

Para las pruebas de laboratorio y un análisis de la evolución del ensayo de oxidación cíclica, se tomaron muestras de la cantidad de masa ganada cada cierto número de ciclos, además de hacer las extracciones a diferentes tiempos para el análisis en SEM. Las tomas de masa se harán luego de iniciada la prueba en los ciclos 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200 y 500: Las extracciones de probetas para la temperatura de 600 °C se muestran en la Tabla 4, y para 500 °C en la Tabla 5.

Tabla 4. Extracciones a 600 °C

Extracciones 600 °C	
Probeta	Ciclo
7	5
3	10
9	25
14	50
5	50
1	100
10	150
8	200
6	200
12	200
16	500
2	500

Tabla 5. Extracciones a 500 °C

Extracciones 500 °C	
Probeta	Ciclo
1	25
12	25
2	100
11	100
3	200
10	200
4	500
5	500
6	500
7	500
8	500
9	500

3.3.3 INICIO DE LA PRUEBA.

Se inició la prueba de oxidación cíclica a 600 °C y se fueron haciendo las respectivas extracciones de probetas y censos de masas los cuales se muestran diligenciados en la Tabla 6.

Tabla 6. Masas a 600 °C

Probeta	Material	Masa a 0 ciclos	Masa a 5 ciclos	Masa a 10 ciclos	Masa a 25 ciclos	Masa a 50 ciclos	Masa a 100 ciclos	Masa a 150 ciclos	Masa a 200 ciclos	Masa a 500 ciclos
1	Cr-Ni	3,3237	3,3445	3,3485	3,3537	3,3713	3,3944	N/A	N/A	N/A
2	Cr-Ni	3,4684	3,4863	3,4907	3,4967	3,5184	3,5513	3,5889	3,5966	3,6365
3	Cr-Ni	2,5308	2,5469	2,5505	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Cr-Ni	2,7858	2,8116	2,818	2,8261	2,8393	2,8647	2,8904	2,8983	2,9295
5	Cr-Ni	2,4964	2,5156	2,5207	2,5281	2,5419	N/A	N/A	N/A	N/A
6	Cr-Ni	2,5719	2,5904	2,5973	2,6084	2,617	2,6258	2,5382	2,6431	N/A
7	Cr-Ni	3,7707	3,7973	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
8	Cr-Ni	3,2895	3,3192	3,3267	3,3344	3,3406	3,3474	3,3568	3,3591	N/A
9	Cr-Ni	3,0008	3,0232	2,929	2,9362	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
10	Cr-Ni	3,1164	3,1404	3,1467	3,1552	3,164	3,1744	3,1933	N/A	N/A
11	Cr-Ni	2,8954	2,9225	3,0278	3,0306	3,0341	3,0406	3,051	3,0547	3,1489
12	A53	3,5188	3,5276	3,5272	3,5292	3,5323	3,55	3,565	3,3644	N/A
13	A53	3,5944	3,6064	3,609	3,6147	2,7241	2,7178	2,7639	2,7781	2,8344
14	A53	3,2667	3,2807	3,2793	3,2832	3,29	N/A	N/A	N/A	N/A
15	A53	2,7057	2,7201	2,7177	2,7268	3,6281	3,6754	3,5973	3,5483	3,6231
16	A53	3,12	3,1351	3,1348	3,1401	3,1645	3,1315	3,1049	3,1236	3,2565

Respectivamente se procedió igual para la temperatura de 500 °C, pero previo a la prueba se realizó un cambio de cemento refractario. La Tabla 7 muestra sus resultados.

Tabla 7. Masas para 500°C

Probeta	Material	Masa a 0 ciclos	Masa a 5 ciclos	Masa a 10 ciclos	Masa a 25 ciclos	Masa 50 ciclos	Masa 100 c	Masa 150 c	Masa 220 c	Masa 500 c
1	Cr-Ni	2,7774	2,7876	2,7918	2,7931	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2	Cr-Ni	2,9797	2,99	2,9938	2,9942	2,9972	3,0004	N/A	N/A	N/A
3	Cr-Ni	3,1366	3,1531	3,1578	3,1589	3,1605	3,1661	3,1674	3,1704	N/A
4	Cr-Ni	2,9228	2,9392	2,9438	2,9451	2,9462	2,9511	2,953	2,9556	2,9612
5	Cr-Ni	3,9474	3,9641	3,9698	3,9702	3,9729	3,9754	3,9772	3,9805	3,9882
6	Cr-Ni	2,7279	2,7432	2,7482	2,7497	2,7497	2,7532	2,7546	2,7573	2,7629
7	A53	2,7101	2,7123	2,7136	2,7142	2,7151	2,7165	2,7171	2,7189	2,7235
8	A53	3,2744	3,2769	3,2784	3,2788	3,2798	3,2814	3,2827	3,2838	3,2895
9	A53	2,8289	2,8316	2,8344	2,8345	2,8348	2,8379	2,8393	2,8412	2,8474
10	A53	3,0069	3,0101	3,0121	3,0134	3,0134	3,0164	3,0178	3,0204	N/A
11	A53	3,1079	3,1119	3,1149	3,1161	3,1167	3,1177	N/A	N/A	N/A
12	A53	3,5485	3,5519	3,5559	3,5568	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Cabe resaltar que en el catálogo del fabricante del horno se recomienda dejar reposar el horno 1 hora por cada 100 horas de trabajo, en este mismo reposo también se recomienda hacer drenaje del compresor, por lo tanto se hicieron las pausas en los ciclos y se retomó la prueba luego de dicho reposo.

3.3.4 ALMACENAMIENTO DE LAS MUESTRAS.

En cada extracción se debe garantizar que las muestras no ganen óxido de un origen distinto al de la prueba, por ello se almacenaron en el desecador (Fig.6 a) ubicado en el laboratorio de metalografía de la facultad de ingeniería mecánica, teniendo presente la numeración previa de cada una de las muestras (Fig. 6 b).



A

B

Figura 6. A. desecador, B. colocación de probetas.

3.3.5 FINALIZACIÓN DE LA PRUEBA DE OXIDACIÓN CÍCLICA.

Las dos pruebas finalizaron y se mantienen las probetas para la caracterización y análisis de composición.

3.4 CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO SEM.

El microscopio electrónico de barrido *SEM*, por su abreviación el inglés (*Scanning Electron Microscope*), es un dispositivo que permite producir imágenes de alta resolución de la superficie analizada, como principio de funcionamiento utiliza la interacción de electrones con el material a analizar mediante un haz, este método consiste en un barrido de la probeta que se analizara la cual es impactada por electrones acelerados que viajan a través de un cañón. Un detector en la misma máquina conformado por diferentes lentes y sensores mide la cantidad e intensidad de los electrones que rebotan de la probeta, siendo capaz de captar imágenes de hasta 100.000 aumentos en una resolución muy alta. Así mismo, con la cantidad de electrones rebotados el microscopio es capaz de decir con una exactitud de 97% el análisis de composición química de la muestra.

3.4.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA SEM.

Las probetas se empastillaron de a dos para ahorro de material y tiempo de lijado, quedando las muestras de trabajo así:

Tabla 8. Emparejamiento de muestras a 600°C

Empastillado	7
	3
Empastillado	9
	14
Empastillado	1
	5
Empastillado	10
	8
Empastillado	2
	16

Tabla 9. Emparejamiento de muestras a 500°C

Empastillado	1
	12
Empastillado	9
	14
Empastillado	1
	5
Empastillado	10
	8
Empastillado	4
	9

Como se muestra, no se empastillaron algunas probetas tanto del material normal, como del material recubierto, estas probetas se guardaron para futuros análisis y algunas de ellas fueron enviadas para análisis de composición por difracción de rayos X (*DRX*).

3.4.2 PREPARACIÓN METALOGRAFÍA.

Siguiendo la norma ASTM E3 se llevaron las probetas a brillo espejo con ayuda de lijas y paños de pulido garantizando la menor presencia de rallado en la superficie. No se ataco químicamente la superficie para no alterar análisis de composición.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la prueba de oxidación cíclica, la ganancia de masa se obtiene con la exposición del material frente a temperaturas elevadas ante cierto gas, en este caso aire, a continuación especificaremos para cada temperatura su comportamiento de masas y de espesores ganados por la prueba y comparando entre sí.

4.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

4.1. 1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE MASAS A 600°C

La prueba se realizó con 16 probetas de acero ASTM A53 GRADO B de las cuales 11 estaban con recubrimiento y 5 no, fueron ensayadas cíclicamente durante 500 horas a 600° Celsius. El tiempo de exposición de cada probeta aumentó gradualmente, sin embargo, cada cierta cantidad de ciclos cumplidos se retiraban probetas para su posterior estudio, obteniendo muestras que permitieran observar el comportamiento del material en un tiempo establecido.

El comportamiento mostrado por las probetas recubiertas, en cuanto a ganancia de masa, respecto al tiempo de exposición se analizó estadísticamente y se comparará con las probetas originales como se muestra a continuación:

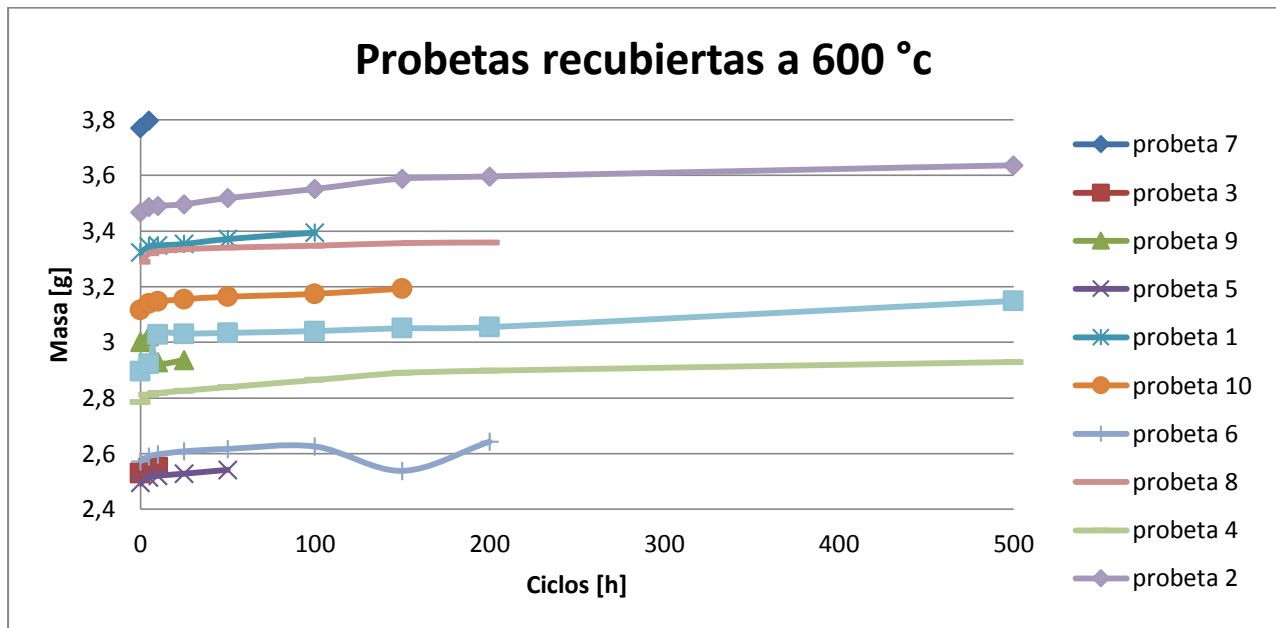


Ilustración 1: Curvas de ciclos vs masas de probetas recubiertas a 600 °C

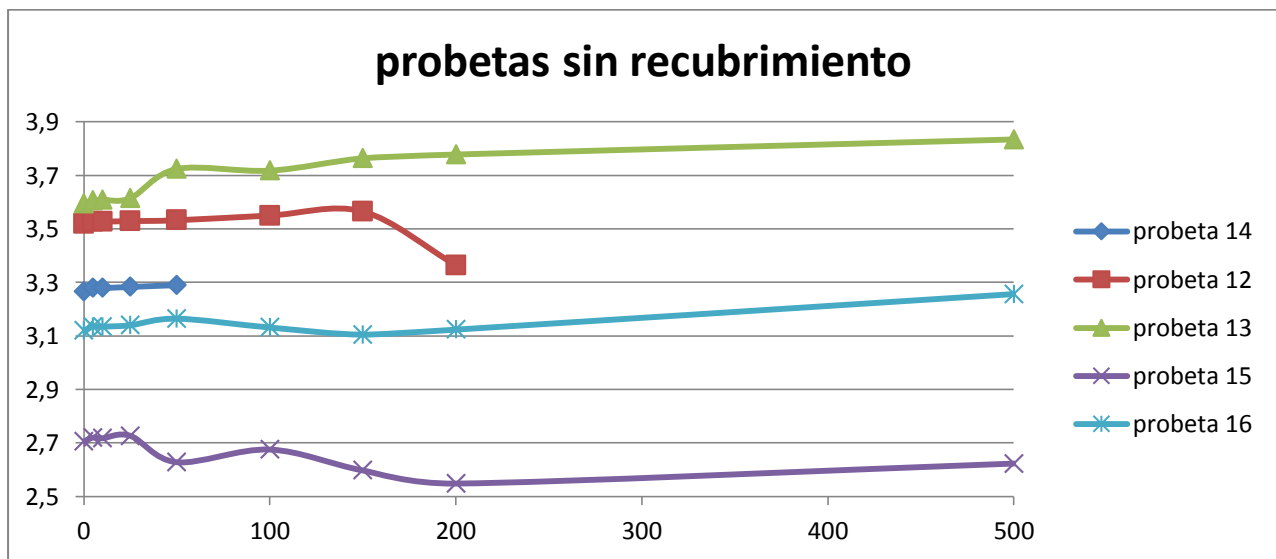


Ilustración 2: Curvas de ciclos vs masas de probetas sin recubrimiento a 600 °C

En el proceso de oxidación cíclica, la ganancia de peso incrementa con el aumento del tiempo de exposición del material, frente a una temperatura elevada. Se puede observar una mayor inestabilidad en el patrón de crecimiento en las probetas sin recubrimiento, esto se debe a que las capas de oxido formadas sobre el acero puro tienen poca fuerza de cohesión y tienen fácil desprendimiento a pesar del cuidado en el manejo de estas durante la investigación. A

continuación se muestran en las ilustraciones 3, 4, 5 y 6 más de cerca el comportamiento de las masas a lo largo de la prueba para los primeros 100 ciclos.

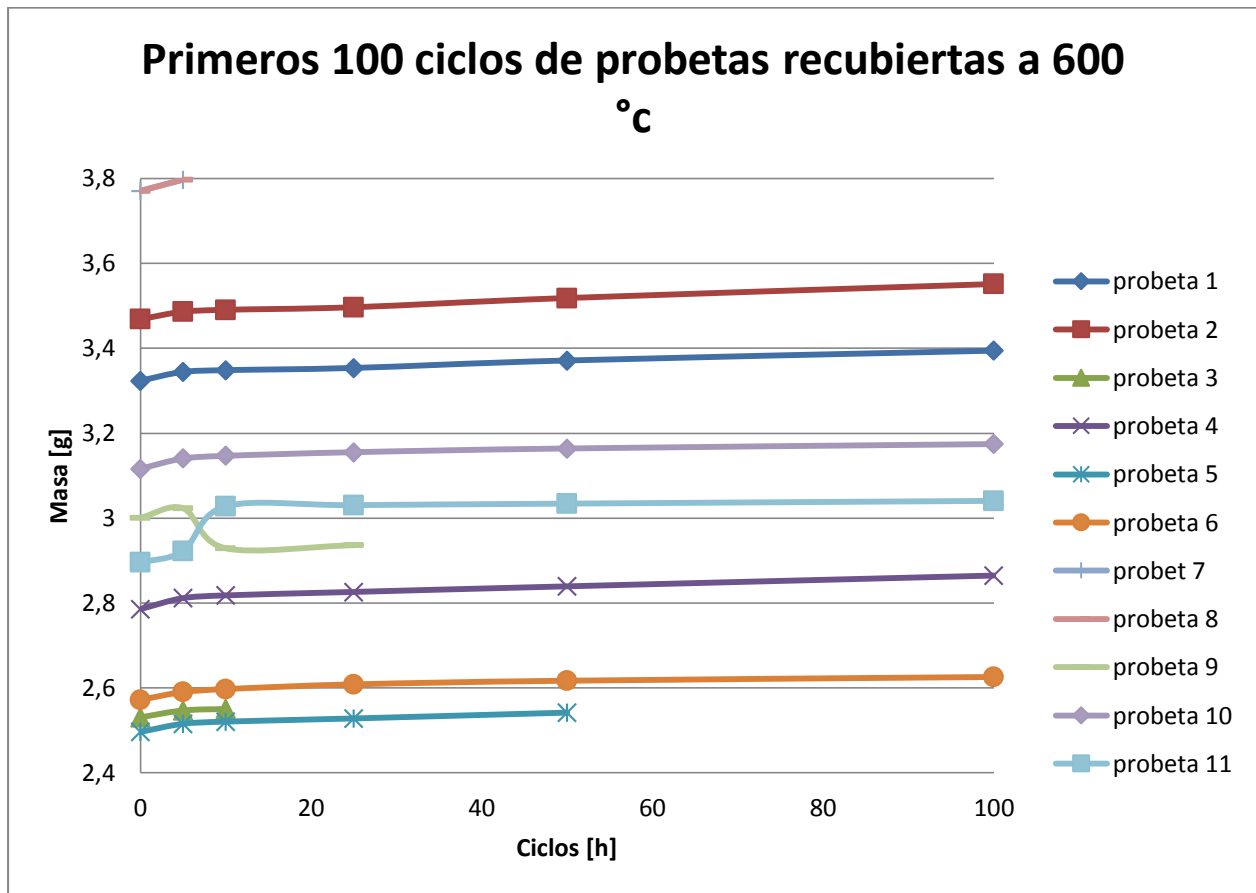


Ilustración 3: primeros 100 ciclos de probetas recubiertas a 600 °C

En la ilustración anterior se observan curvas interrumpidas (probeta 3, 5, 7 y 8) esto se debe a que en esa cantidad de ciclos se hicieron extracciones de dichas probetas.

Como se observa en la ilustración 3, las probetas que fueron sometidas a rociado térmico con Cr-Ni tienen un comportamiento lineal con crecimientos de óxidos muy pequeños para los primeros 100 ciclos, el caso de la caída abrupta de masa de la probeta 9 se pudo deber a mala adherencia del recubrimiento, y en el transcurso de la prueba se hizo inminente el desprendimiento de este, cayendo así su valor de masa muy por debajo del inicial.

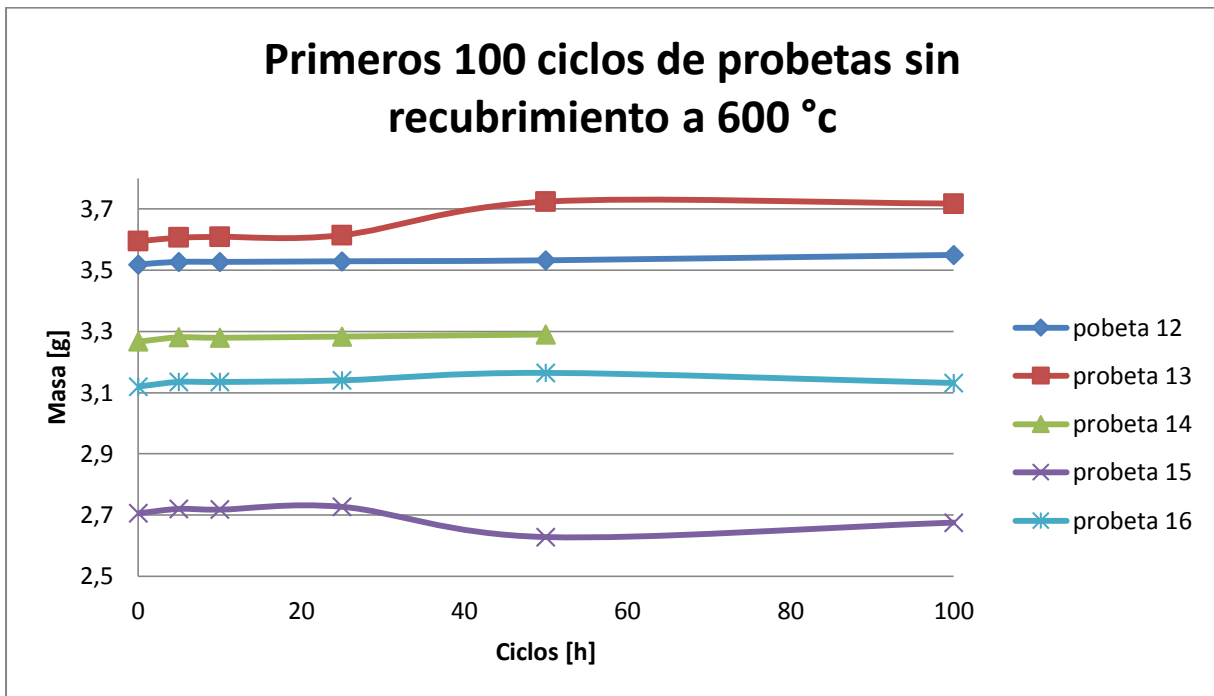


Ilustración 4: primeros 100 ciclos de probetas sin recubrimiento a 600 °c

Para las probetas sin recubrimiento se aprecia un comportamiento alternante (ilustración 4) , pues se crean capas de óxidos con poca adherencia las cuales efecto de dilataciones térmicas se desprenden y rápidamente se vuelven a crear nuevas capas teniendo por tal motivo la variación de más o menos masa con respecto a las mediciones anteriores, este proceso es contraproducente pues por cada capa que se desprende se va parte el material base por acción de la corrosión. El comportamiento decreciente de la probeta 13 se debe a que esta ya traía corrosión en su superficie y al crearse las capas de óxidos se desprendió está reduciendo así su masa.

Ahora se mostrarán los comportamientos para ciclos mayores a 100.

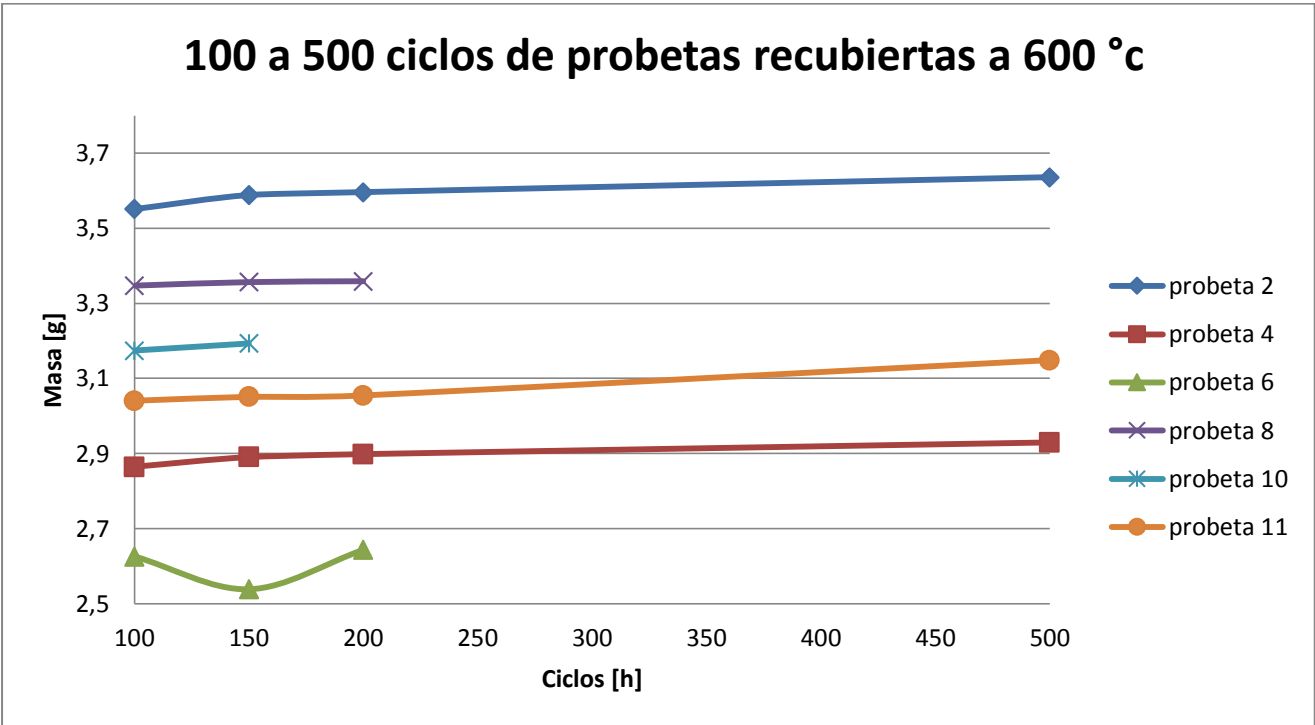


Ilustración 5: 100 a 500 ciclos de probetas recubiertas a 600 °c

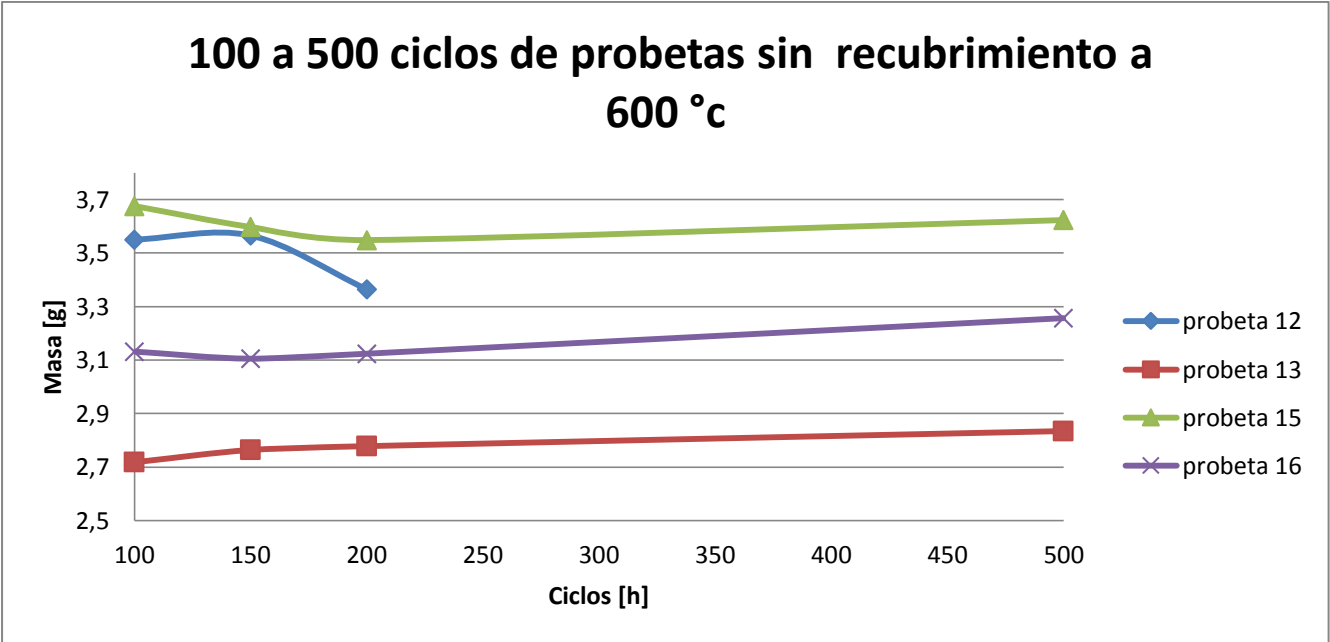


Ilustración 6: 100 a 500 ciclos de probetas sin recubrimiento a 600 °c

En el resto de ciclos se observó un comportamiento más estable para la mayoría de las probetas recubiertas con crecimientos de masa muy pequeños, sólo la probeta 6 presento caída en su masa, por lo que en su mayoría el comportamiento se consideró estable.

Sin embargo para el resto de la prueba, con las probetas sin recubrimiento no se ven comportamientos uniformes, puesto que las masas suben y bajan de valor con el aumento de los ciclos a razón de la poca adherencia de los óxidos que se forman.

4.1.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE MASAS A 500°C.

Para esta temperatura al ser menor se trabajo con menos muestras de material, pues es la temperatura promedio de trabajo de una caldera y de igual forma el estudio estadístico se hace valedero. Se usaron 6 probetas recubiertas con Cr-Ni y 6 sin ningún recubrimiento.

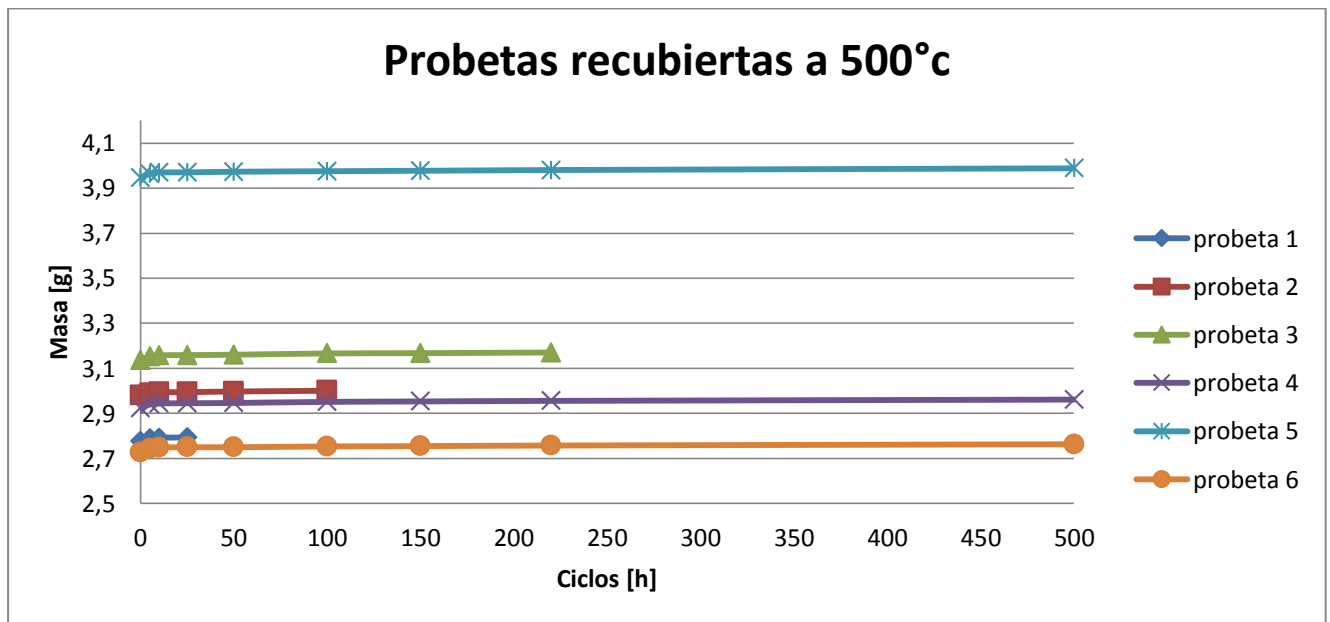


Ilustración 7: Probetas recubiertas a 500°C

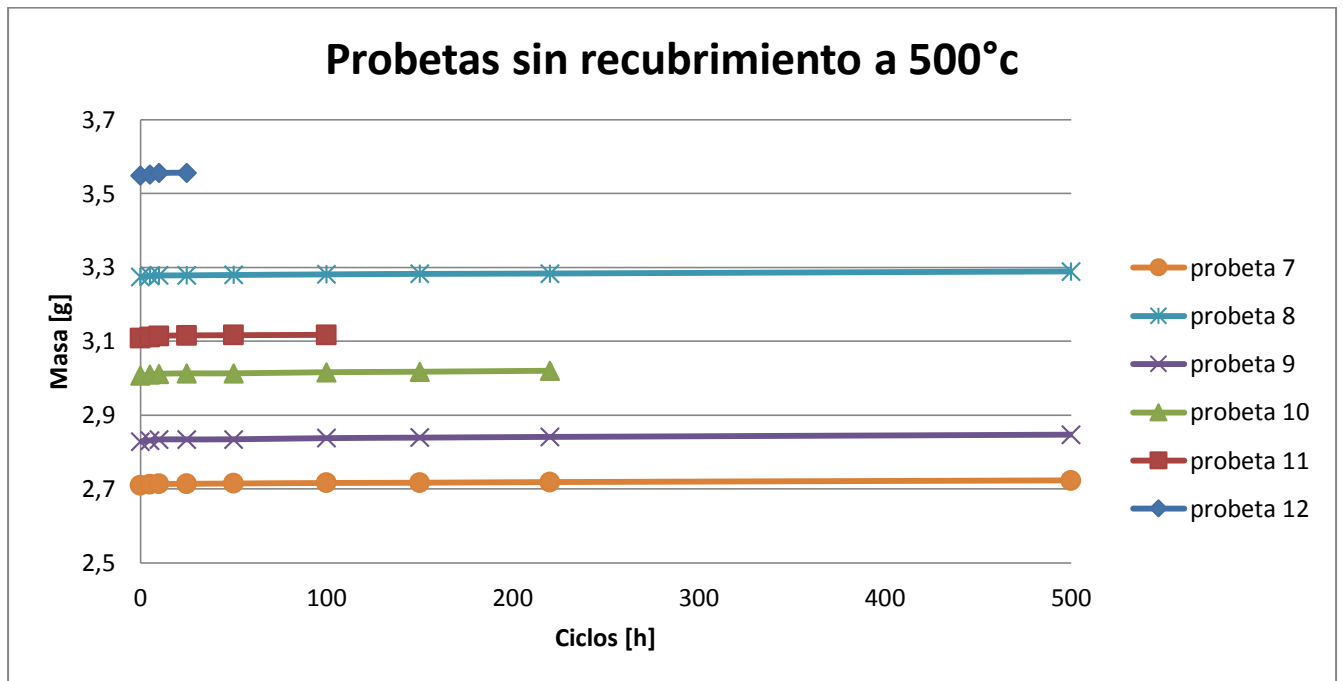


Ilustración 8: Probetas sin recubrimiento a 500°C

Como se observó, a temperaturas relativamente más bajas de oxidación el comportamiento es mas organizado para probetas sin recubrimiento en general (ilustración 8) y la formación de óxidos es mucho más lenta y leve, se analiza más a fondo que pasa en los primeros ciclos y los últimos por separado en las ilustraciones 9,10,11 y 12.

De manera general el comportamiento de las probetas sometidas a oxidación cíclica a 500 °C presentan un comportamiento similar y estable tanto para las recubiertas con Cr-Ni como para las que no tienen recubrimiento.

Para el resto de los ciclos se nota un comportamiento similar, no se presentan caídas de masa en las probetas que no tienen recubrimiento y las recubiertas se mantienen con crecimientos mínimos a lo largo de la prueba.

4.1.3 COMPARACIÓN DE PRUEBAS A 600 Y 500 °C.

A continuación se muestran comparaciones de masas a lo largo de la prueba para ambas temperaturas:

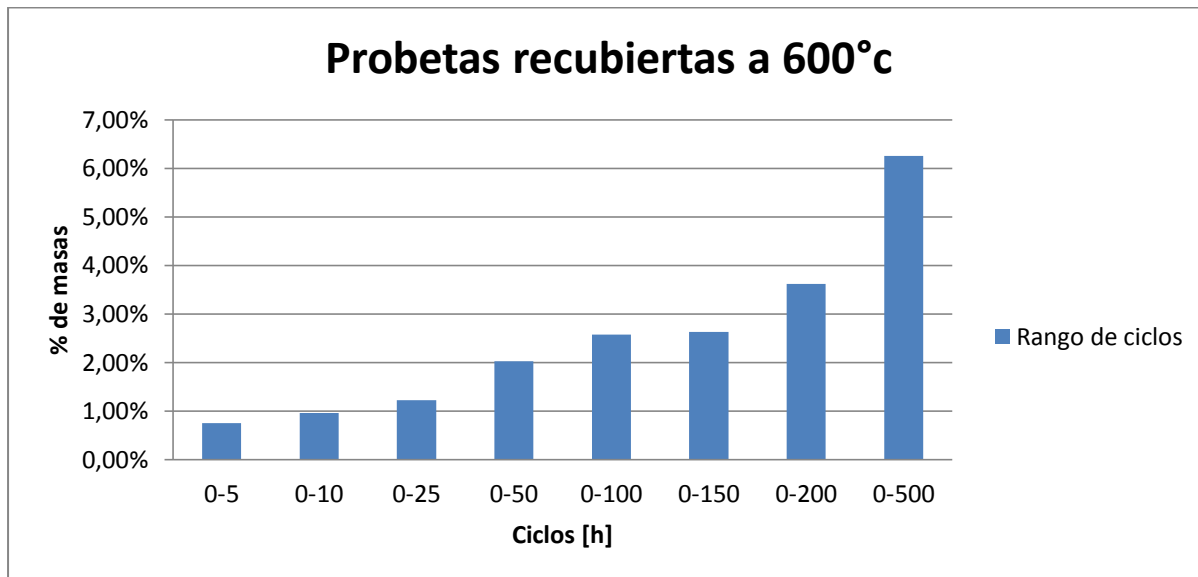


Ilustración 9: porcentajes de masa ganada a probetas recubiertas a 600°C

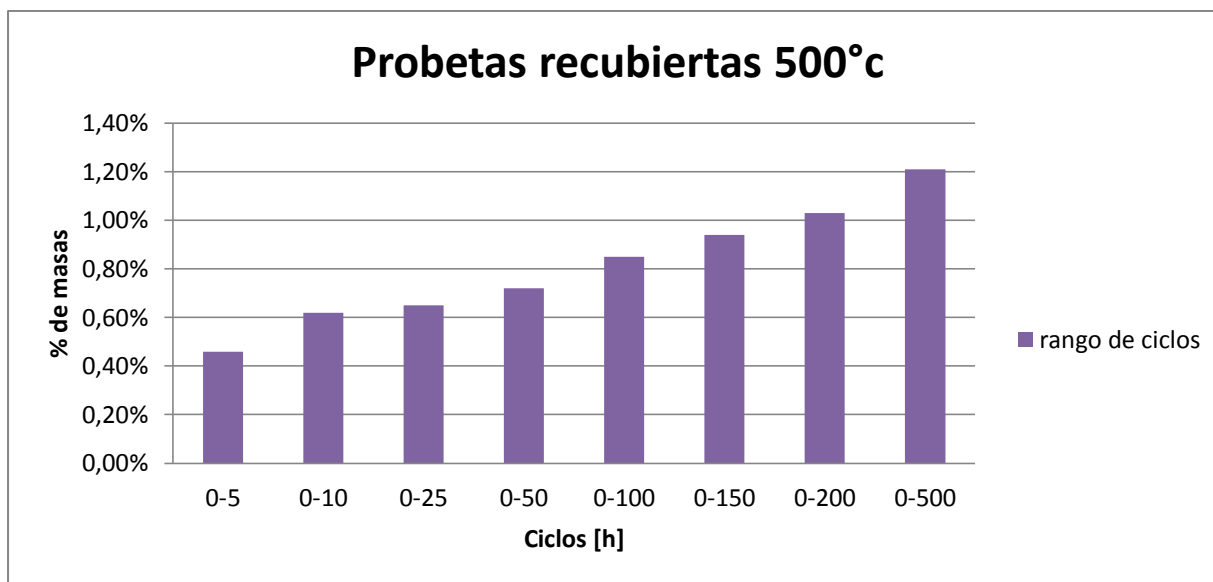


Ilustración 10: porcentajes de masa ganada a probetas recubiertas a 500°C

Las probetas a 600°C (ilustración 13) tienen un comportamiento de crecimiento de masa exponencial debido a que con mayores temperaturas el proceso de generación de óxidos es más acelerado pero no por ello se verá afectado el material base, pues estos óxidos son óxidos de

cromo-níquel y tendrán un comportamiento de capa protectora sobre el recubrimiento, en el caso de las probetas sometidas a 500°C (ilustración 14) se presenta un crecimiento con tendencia lineal y porcentajes de masa más bajos, esto también es muy favorable para el material base, puesto que se conserva la capa de recubrimiento sin desprendimientos ni caída de masa alguna.

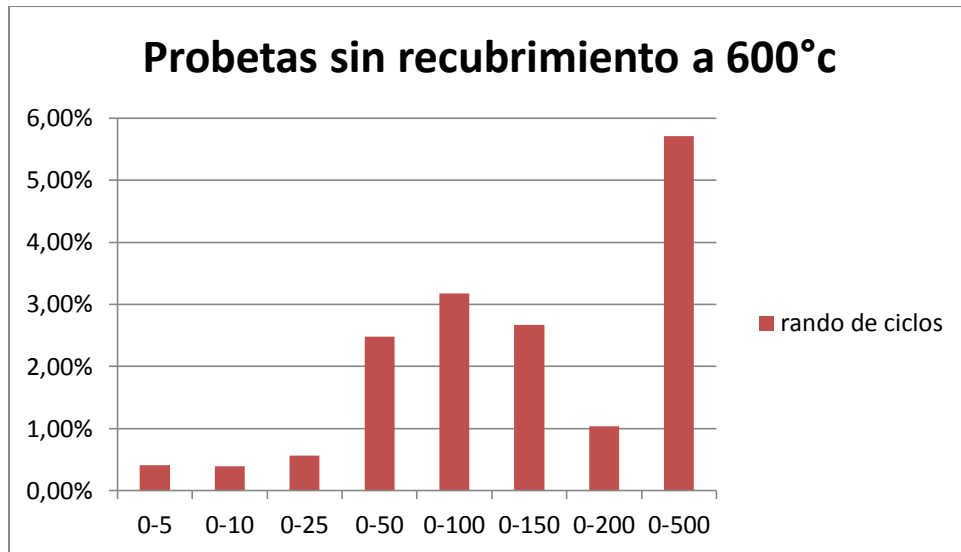


Ilustración 11: porcentajes de masa ganada a probetas sin recubrimiento a 600°C

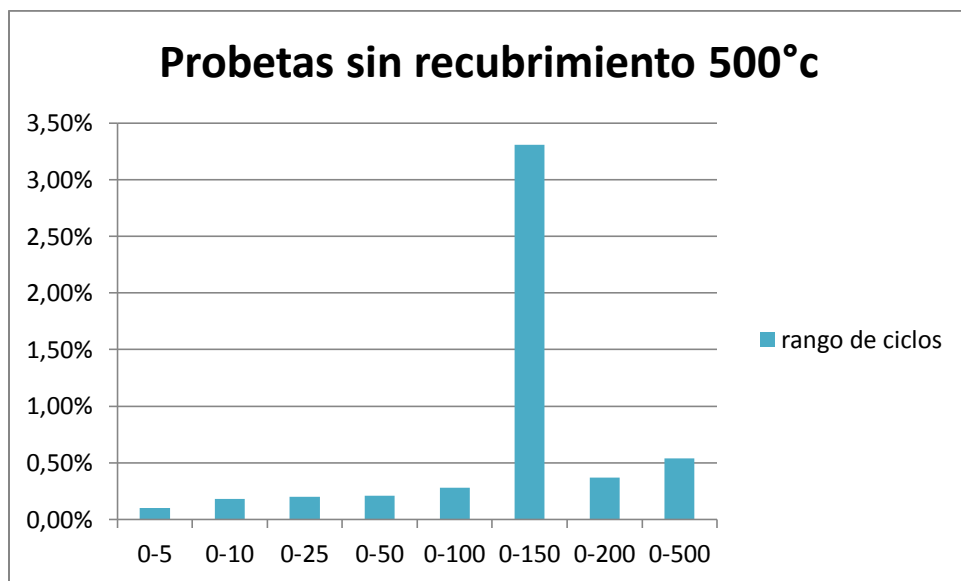


Ilustración 122: porcentajes de masa ganada a probetas sin recubrimiento a 500°C

Para las probetas sin recubrimiento se ve un comportamiento poco uniforme puesto que como se mostró anteriormente, se producen muchos desprendimientos de material corroído por las capas de óxido, a 600°C (ilustración 15) es más severa la variación y así se comportará a medida que las temperaturas sean mayores, los únicos ciclos estables son los primeros; a 500°C el panorama es el mismo pero en porcentajes de ganancia y pérdida más bajos, el pico mostrado se debe a que una de las probetas presentó más alta oxidación con respecto a las otras en un fallo de funcionamiento del dispositivo en el que este estuvo más tiempo expuesto al aire que en el interior en la etapa de calentamiento.

4.2 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO *SEM*.

Este análisis se usó para determinar la composición química y un análisis dimensional de los espesores de las capas de óxido presentes en las probetas sometidas al ensayo de oxidación cíclica; se llevo a cabo en el laboratorio de nanotecnología de la teno-academia del SENA, seccional Dosquebradas, el ensayo se realizo solamente a las probetas sometidas a 600°C, para las probetas sometidas a 500°C se utilizó análisis dimensional de espesores con los microscopios ubicados en las instalaciones del laboratorio de metalografía de la Universidad Tecnológica de Pereira.

4.2.1 MUESTRAS SOMETIDAS A 600°C.

4.2.1.1 PROBETAS SOMETIDAS A ROCIADO TÉRMICO POR ARCO CON CR-NI

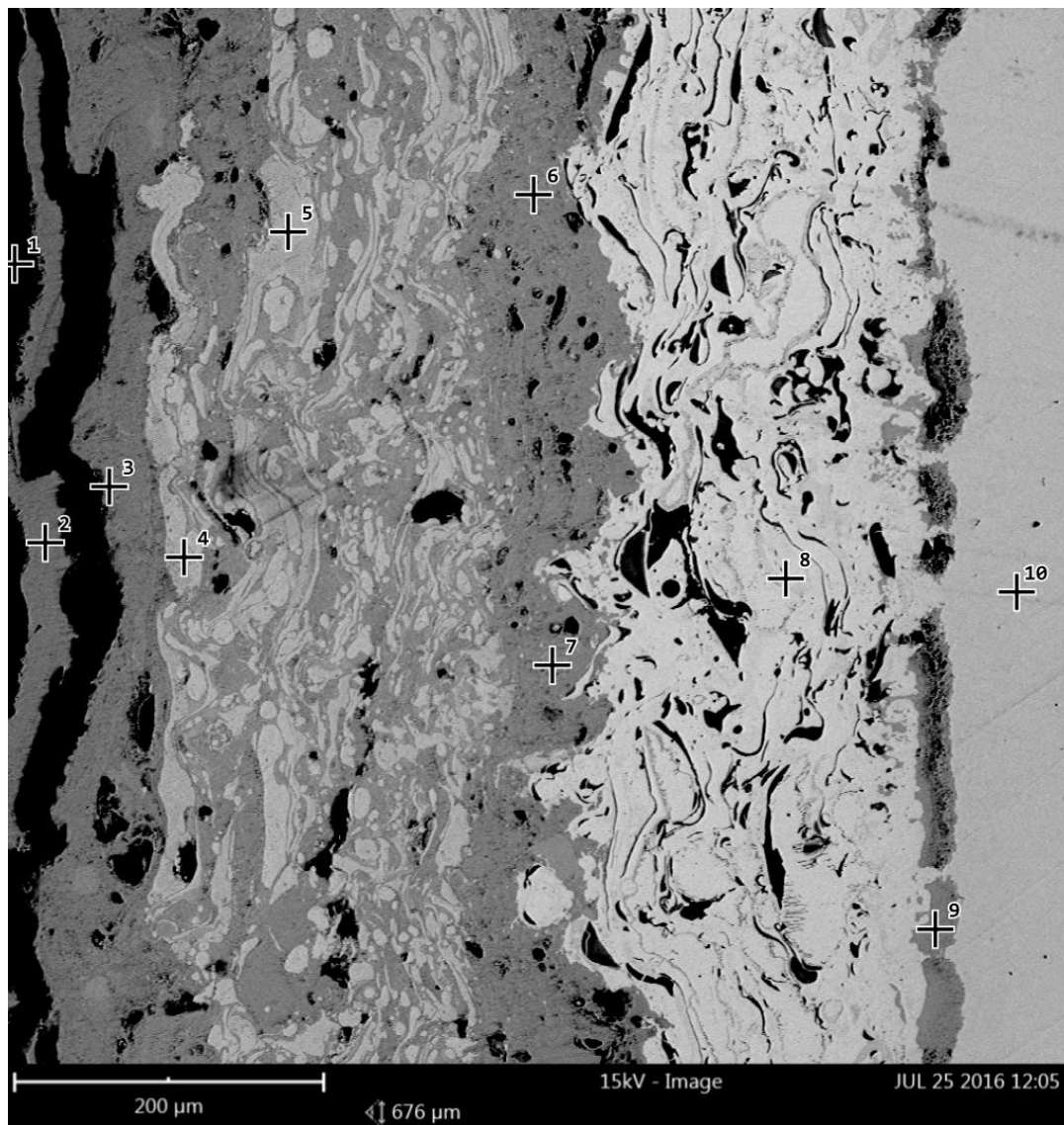


Figura 7: Probeta 1, 100 ciclos, 600°C

Como se puede observar el microscopio nos da la opción de marcar puntos en cualquier sitio de la superficie encuadrada de la probeta 1 con el fin de hacer un análisis de composición química, la cual fue sometida a 100 ciclos, siendo el punto 10 el substrato y el punto 1 el empastillado (resina).

De derecha a izquierda, el punto 9 muestra señales de que el material no fue uniformemente distribuido y presenta porosidades, pues lo que se tiene allí son óxidos de hierro presentados por el equipo así

En el punto 8 de la probeta 1 se presentaron cantidades de níquel y no se evidencia ninguna señal de cromo por lo que se pudo deducir que al aplicar recubrimiento Cr-Ni, el níquel al tener menor punto de fusión (1455°C) y mayor densidad (8908 Kg/m^3) sale con mayor impulso del equipo de rociado térmico, adhiriéndose primero al sustrato que el cromo con punto de fusión mayor (1907°C) y menor densidad (7140 Kg/m^3).

Para el punto 8 de la probeta 1 se vio una clara transición de elementos, analizándolo nos dimos cuenta que ese patrón de colores corresponde a una mezcla de materiales, formando la más concisa aleación de Cr-Ni hasta ahora, y aun así es muy pequeña la porción de este a lo largo de todo el recubrimiento

Para el punto 5 de la probeta 1, se observó que hay presencia de cromo pero no hay presencia de níquel, por lo cual como se dijo anteriormente primero llega el níquel a la superficie del sustrato, luego una pequeña porción de aleación Cr-Ni y seguido de una capa de cromo en la cual se empiezan a presentar pequeñas señales de que hay oxidación.

El punto 3 de la probeta 1, el cual se encuentra en la periferia externa de la toma, en este punto se nota una alta presencia de oxígeno y cromo, lo cual conlleva a deducir que lo que tenemos aquí son óxidos de cromo.

A Continuación se mostraran imágenes de todas las probetas recubiertas a 600°C y analizadas, ya que se tiene clara identificación del patrón de color de cada componente y su significado, se procederá con el análisis dimensional.

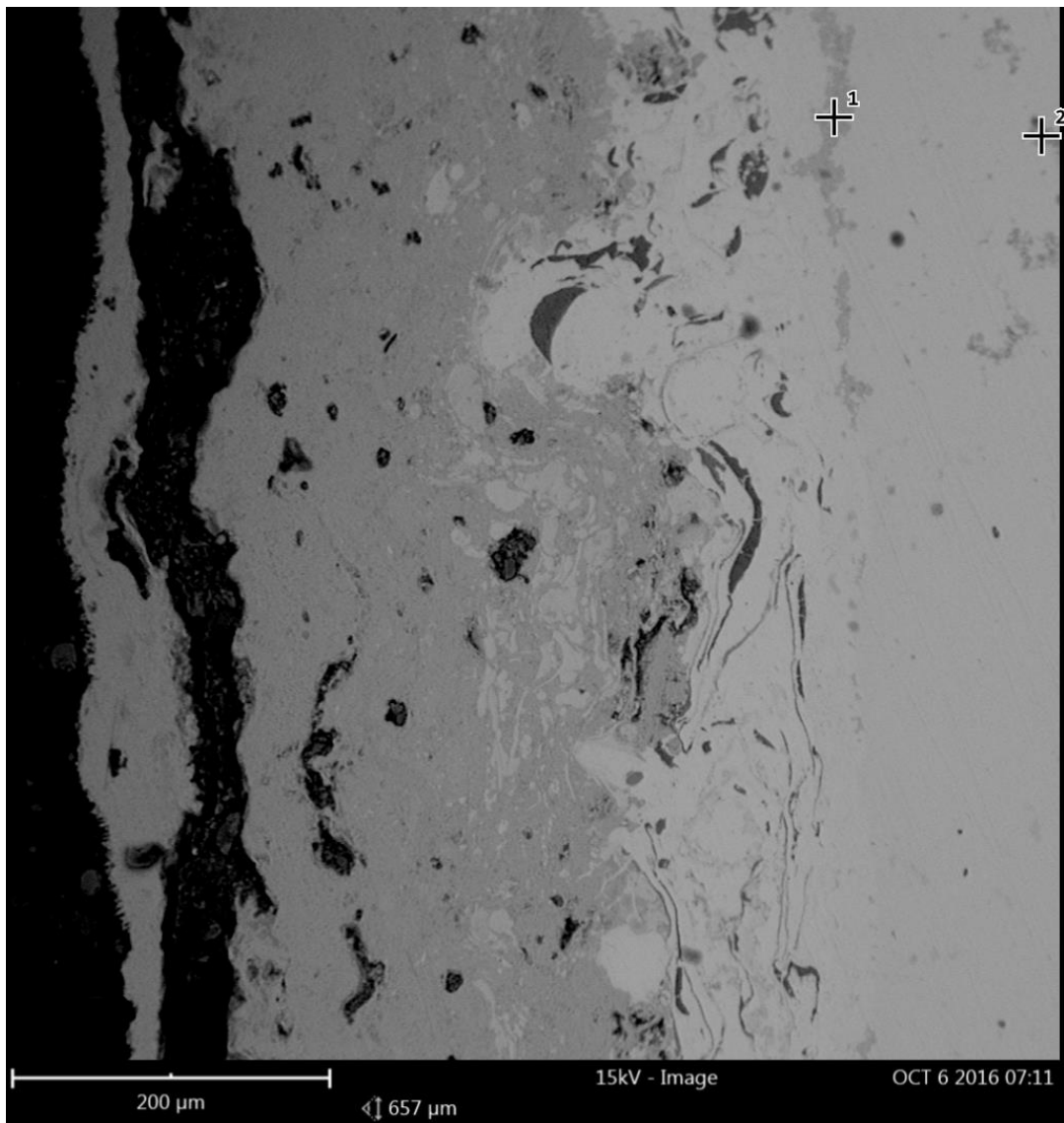


Ilustración 13: Probeta 2, 500 ciclos, 600°C

En la ilustración 13, se pudo observar que hay un desprendimiento de los óxidos de cromo ganados a lo largo de la prueba, afectando muy poco el espesor de la capa del recubrimiento y conservando el substrato intacto.

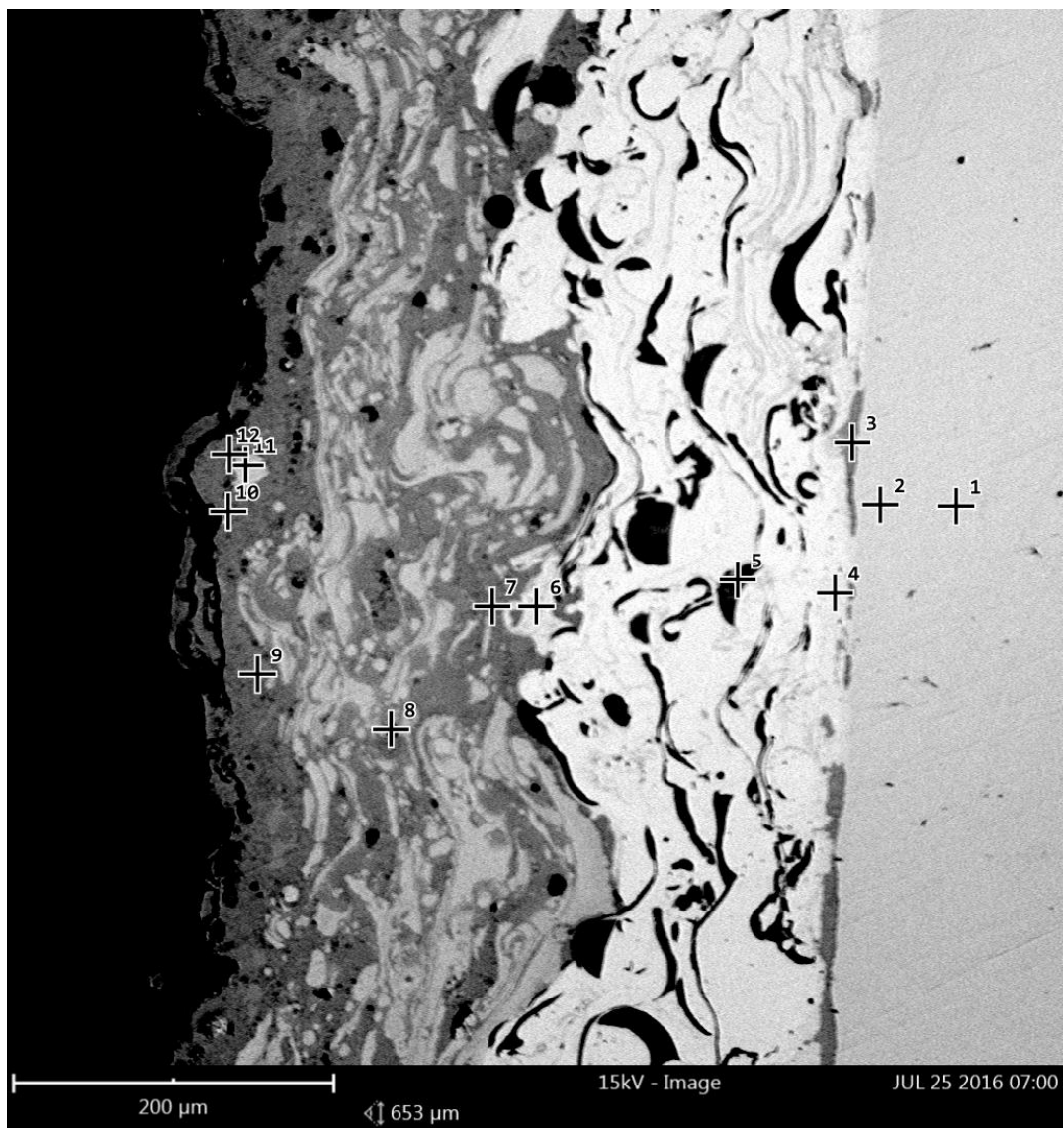


Ilustración 14: Probeta 3, 10 ciclos, 600°C

En la ilustración 14, se ve que el material presenta porosidades, lo que ocasionó una mínima capa de óxido en el sustrato (punto 3), el nódulo negro en medio del níquel se debe a que por efecto de poros, el microscopio crea espectros en la imagen y en el punto 6 se muestra un claro patrón de formación de óxidos de níquel.

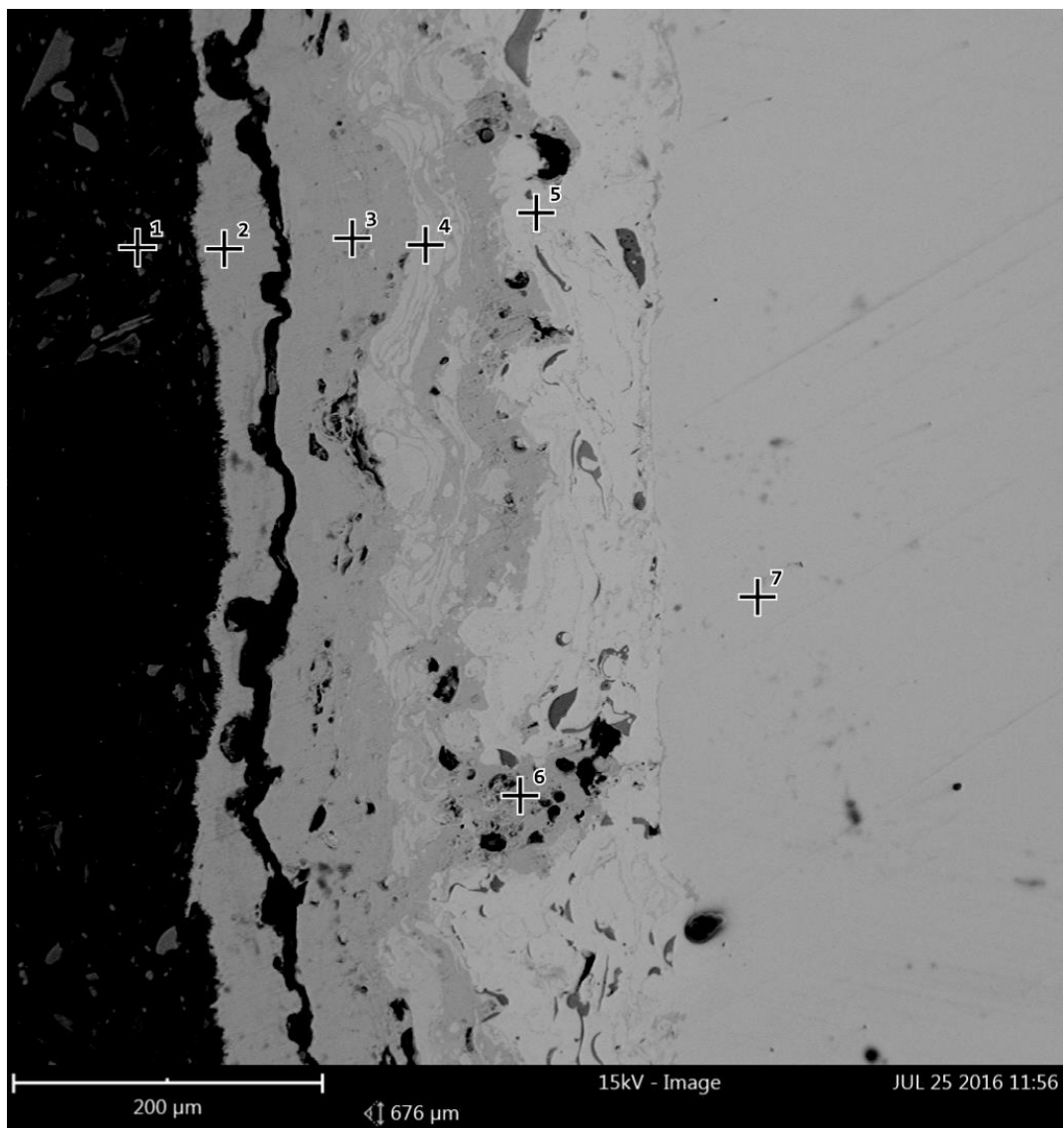


Ilustración 15: Probeta 5, 50 ciclos, 600°C

En el punto 2, a lo largo vemos que se presentó un desprendimiento de la capa de óxidos de cromo en la probeta 5.

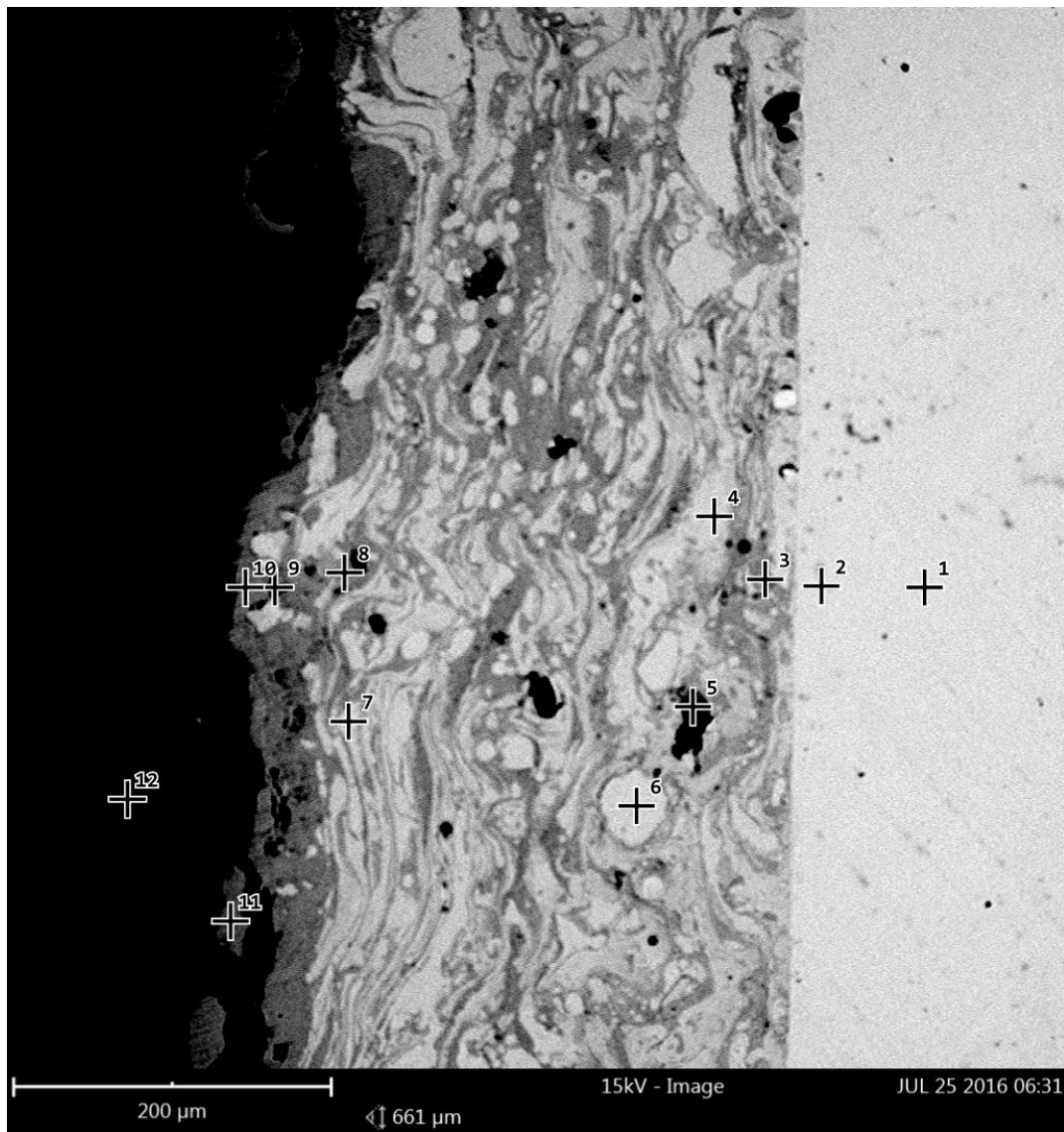


Ilustración 16: Probeta 7, 5 ciclos, 600°C

Este proceso al ser un proceso sin un control establecido, puede presentar casos como este, en el que a lo largo de toda la superficie se deposita una capa de en su mayoría cromo, en el nódulo del punto 6 de la ilustración 16, vemos que se presentó una alta concentración de cromo en un área reducida, por esto se formó esta geometría.

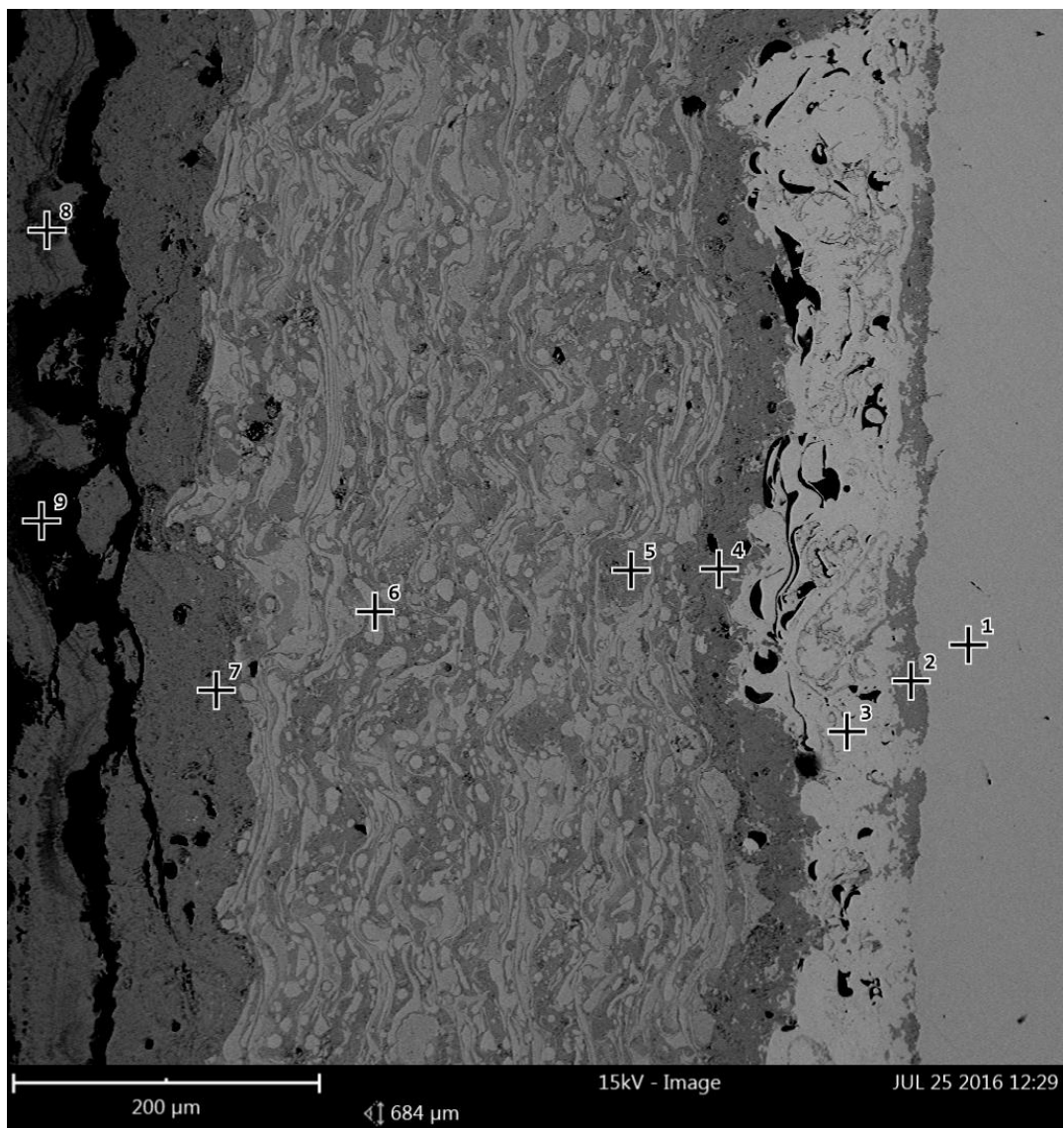


Ilustración 17: Probeta 8, 50 ciclos, 600°C

La ilustración 17 da una visión a un recubrimiento en exceso, en el cual por el poco control en el proceso se presentan excesivos espesores, en el punto 4 por efecto de la porosidad en el recubrimiento se crea una capa de óxidos de níquel.

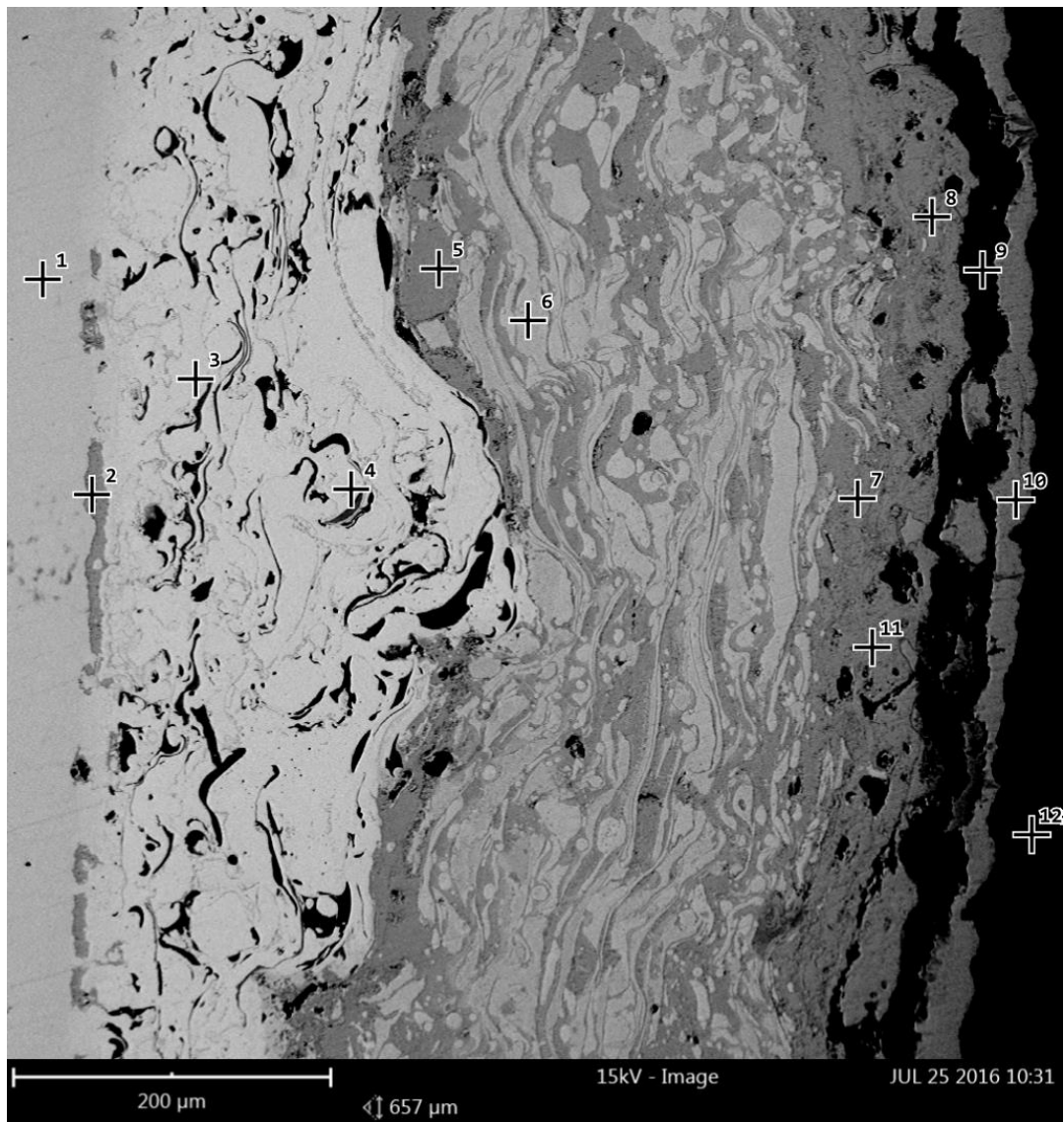


Ilustración 18: Probeta 9, 25 ciclos, 600°C

La probeta mostrada en la ilustración 18 presenta óxidos entre el sustrato y el recubrimiento, a pesar de que el espesor del recubrimiento es muy amplio, este presenta porosidades que originan una leve oxidación en el sustrato. En los puntos 8,10 y 11 se puede ver que la capa de óxidos de cromo originada en la superficie es de estructura porosa y origina un desprendimiento de esta a pesar del poco tiempo que la probeta estuvo sometida a la prueba.

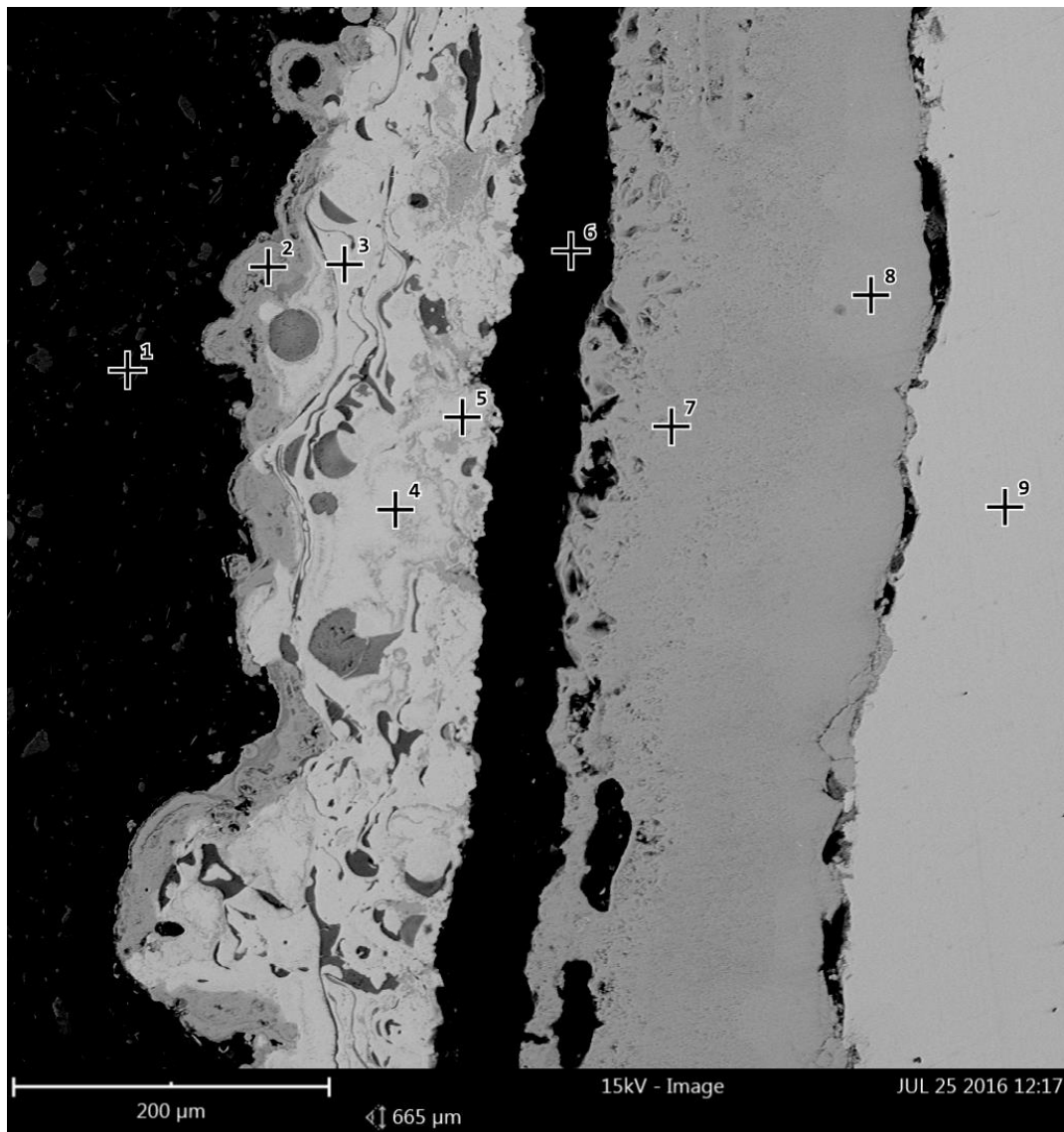


Ilustración 19: Probeta 10, 150 ciclos, 600°C

En este caso tenemos un comportamiento muy particular, la ilustración 19 muestra que la capa de recubrimiento depositada en su mayoría es níquel y esta sufrió desprendimiento de una capa de óxidos de hierro (puntos 7 y 8), lo cual nos hace deducir que el níquel por si solo es demasiado poroso y permite la creación de óxidos de hierro a una escala mayor que los presentados con anterioridad.

A continuación se detallan los espesores calculados con el factor de escala correspondiente a cada imagen.

En la tabla 10, se presentan las diferentes dimensiones de las capas del recubrimiento y de los óxidos ganados durante la prueba de oxidación cíclica, tanto para el sustrato como para el recubrimiento.

Tabla 10: Espesores de los diferentes materiales observados a 600°C

Probeta	Ciclos	Temperatura	Capa Óxidos Hierro	Capa Níquel [μm]	Capa aleacion Cr- Ni [μm]	Capa Cromo [μm]	Capa Óxidos de Cromo [μm]
1	100	600°C	30,77	238,46	80,77	200	100
2	500	600°C	7,69	169,23	0	169,23	165,38
3	10	600°C	9,61	188,46	0	176,92	36,53
5	50	600°C	0,38	146,15	30,76	69,23	96,15
7	5	600°C	0	0	0	307,69	44,23
8	50	600°C	21,15	84,61	44,23	276,92	161,53
9	25	600°C	7,69	238,46	23,076	178,84	92,31
10	150	600°C	192,31	138,46	0	11,53	29,92

4.2.1.2 PROBETAS SIN RECUBRIMIENTO A 600°C.

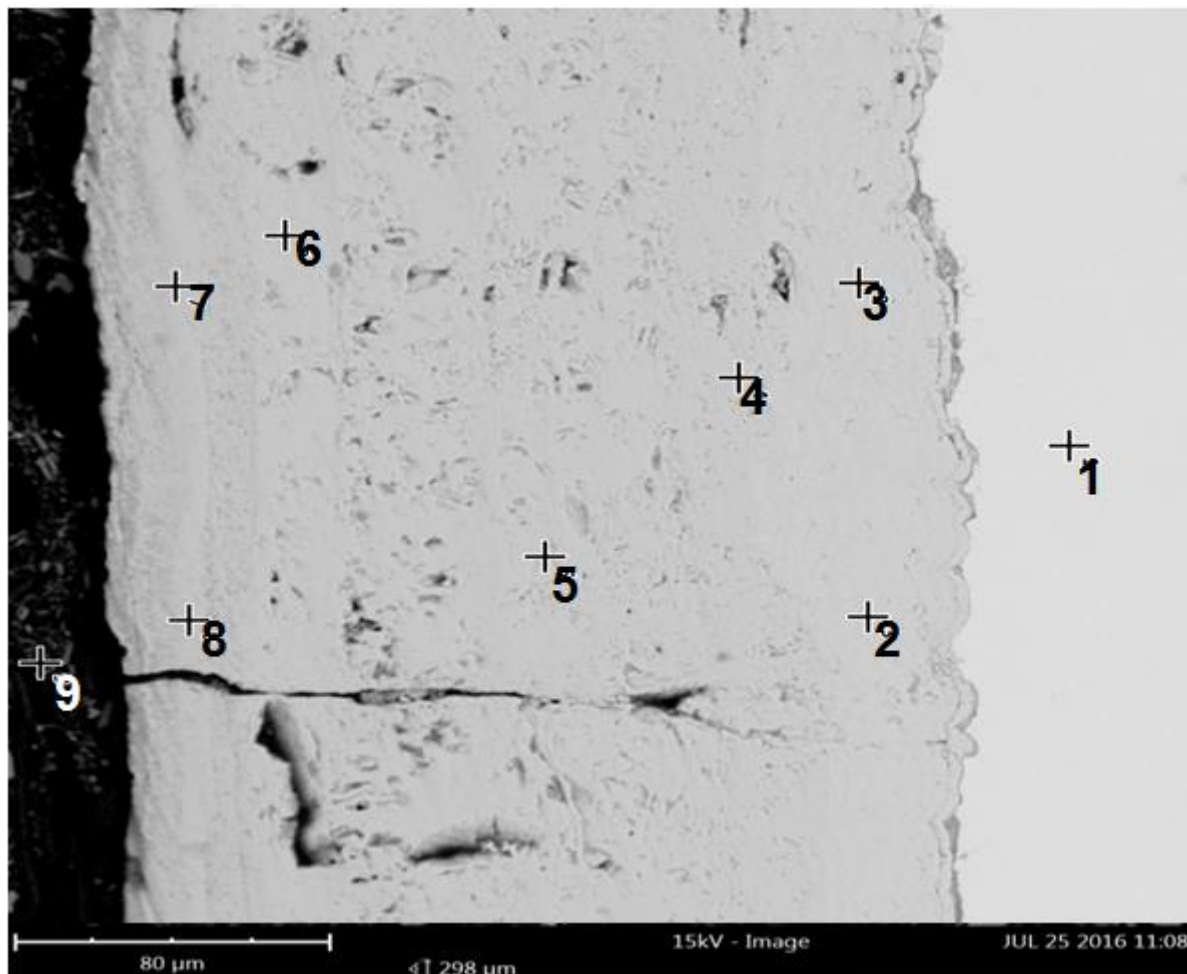


Ilustración 13: Probeta 14, 50 ciclos, 600°C

En la ilustración 20 el punto 1 indica el sustrato y el punto 9 el empastillado, de los puntos 2 al 8 pertenecen únicamente a la capa de óxido creada, además se puede ver deformidad entre el punto de unión entre el sustrato y la capa de óxido a lo largo de todo el encuadre, esto indica que la superficie ha sufrido una corrosión notable en tan solo 50 ciclos, además se ve cercano a los puntos 5 y 8 una fisura que finalmente terminará con el desprendimiento de la película de óxido.

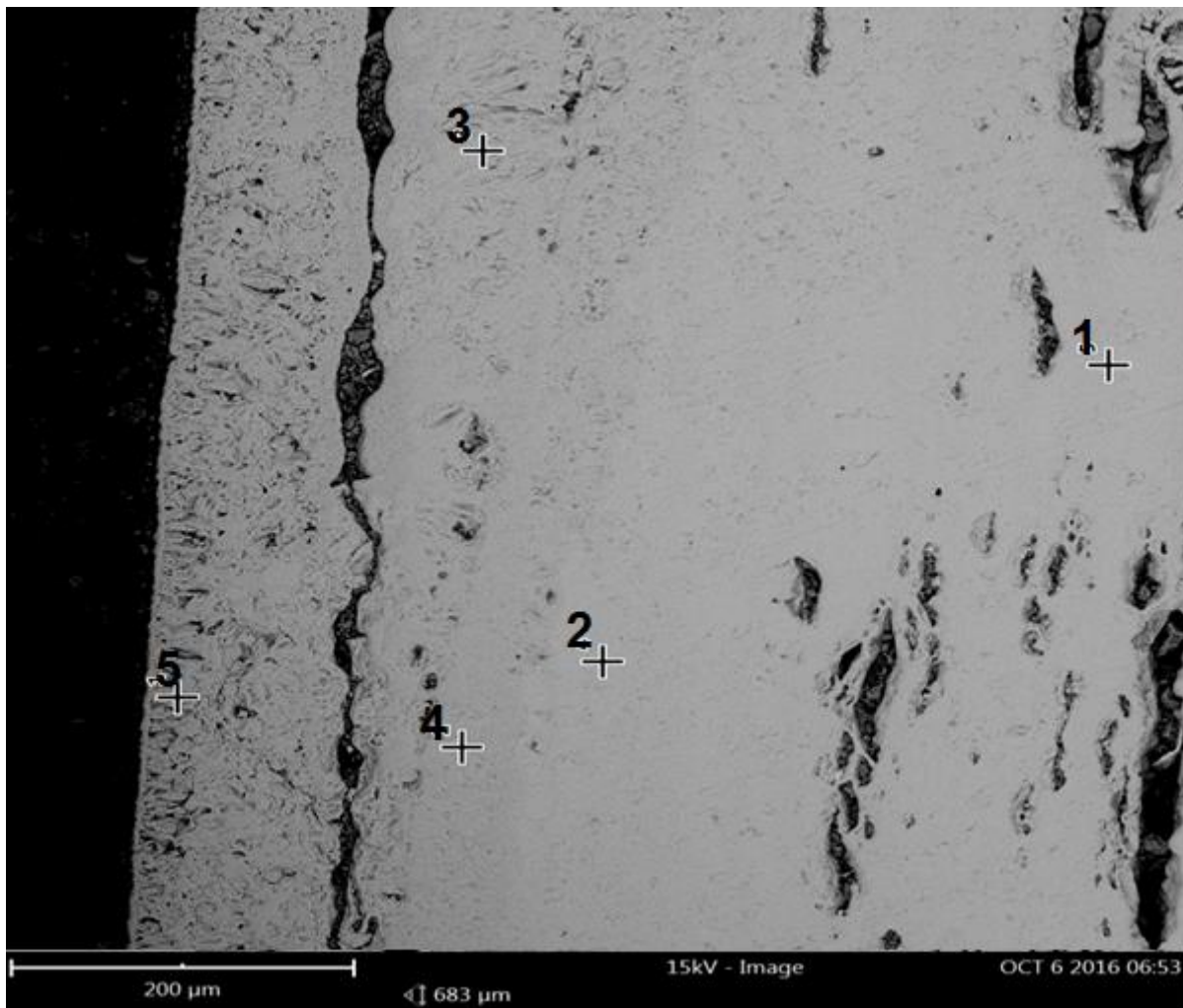


Ilustración 14: probeta 16, 500 ciclos, 600°C

La anterior ilustración muestra una capa de óxido tan grande que no cabe en la totalidad del encuadre, por ende el substrato no se identifica en este. A lo largo de los puntos analizados solo se encuentran óxidos de hierro, y claramente se ve como una parte de este (región del punto 1) se desprendió del resto.

4.3 MICROSCOPIA ÓPTICA A PROBETAS SOMETIDAS A 500°C.

Por motivos ajenos al desarrollo de esta prueba, el microscopio *SEM* no pudo ser usado para el resto de las muestras sometidas a 500°C, por lo cual se procedió la continuación del proyecto con el microscopio convencional ubicado en el laboratorio de metalografía de la universidad tecnológica de Pereira, ya que la composición de los óxidos generados fue obtenida antes por EDS y DRX.

El principio de patrón de los patrones es el mismo con estas tomas, siendo la parte más a la derecha el sustrato, seguido de una pequeña capa de óxido de hierro, luego el níquel, posteriormente una aleación Cr-Ni dando paso al cromo y finaliza con la capa de óxidos de cromo.

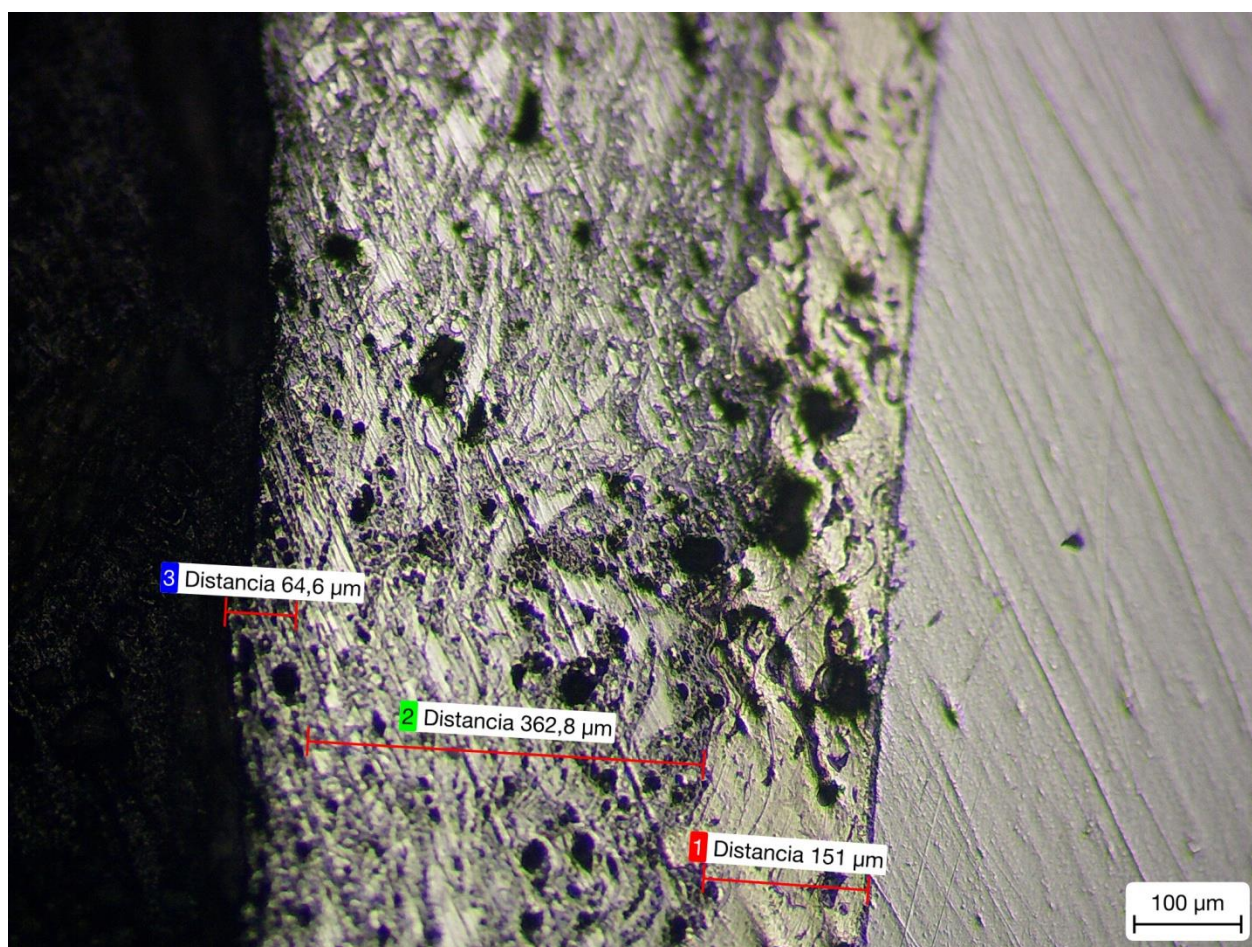


Ilustración 22: Probeta 3, 220 Ciclos, 500°C

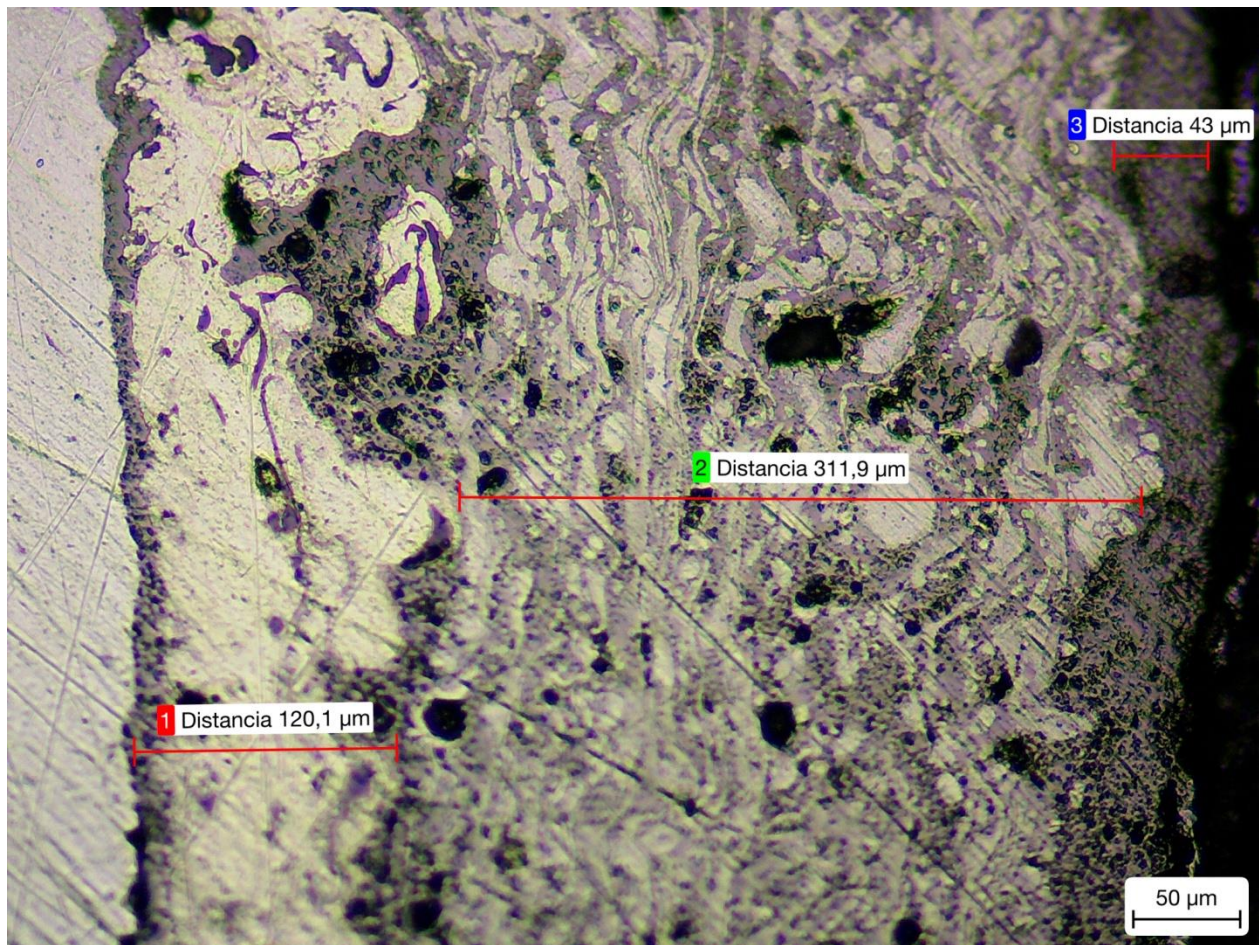


Ilustración 15: Probeta 4, 500 Ciclos, 500°C

Hasta ahora se presentaron en las ilustraciones 22 y 23 las probetas que fueron recubiertas, sometidas a 220 y 500 ciclos respectivamente, y analizadas para microscopia, el software del microscopio daba la capacidad de medir las distancias y entregar una longitud aproximada entre punto y punto con la escala correspondiente, estas distancias se presentan a continuación en la tabla 10.

Los óxidos de níquel crean porosidades a lo largo del recubrimiento como se observa en ambos casos, pero sin presentarse desprendimiento alguno de las capas de óxidos o del recubrimiento como tal, aun en 500 ciclos de oxidación el desprendimiento es del orden de 10 micras.

Tabla 11: Espesores de los diferentes materiales observados a 500°C

Probeta	Ciclos	Temperatura	Capa Óxidos Hierro	Capa Níquel [μm]	Capa aleacion Cr-Ni [μm]	Capa Cromo [μm]	Capa Óxidos de Cromo [μm]
1	25	500°C	0	79	25	138,1	12,5
2	100	500°C	0	242	15	170,3	34,1
3	220	500°C	10	151	120	362,8	64,6
4	500	500°C	25	120,1	25	311,9	43

A continuación se presentaran imágenes de las probetas sin recubrimiento para mirar el comportamiento de los óxidos.

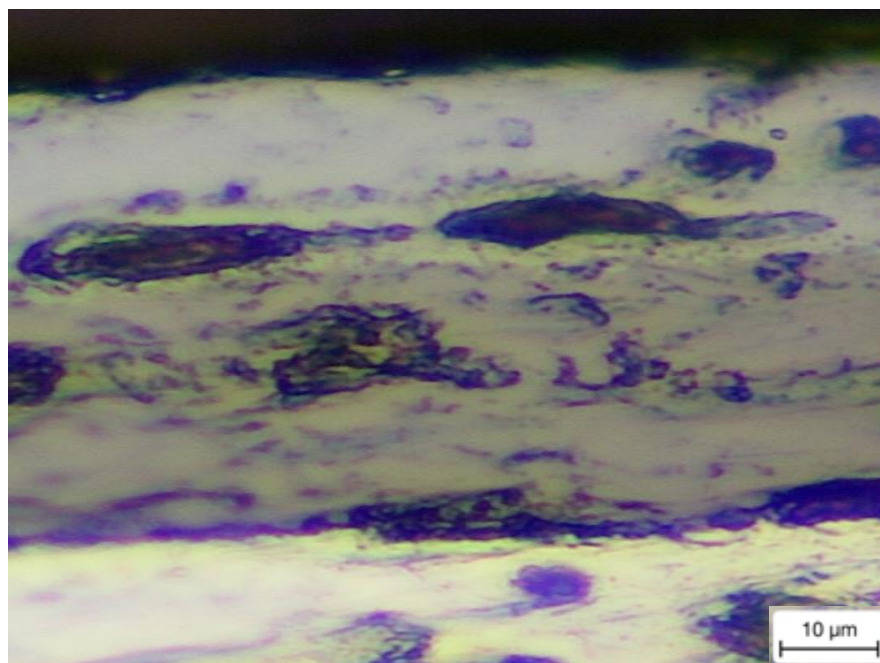


Ilustración 16: Probeta 9, 500 Ciclos, 500°C

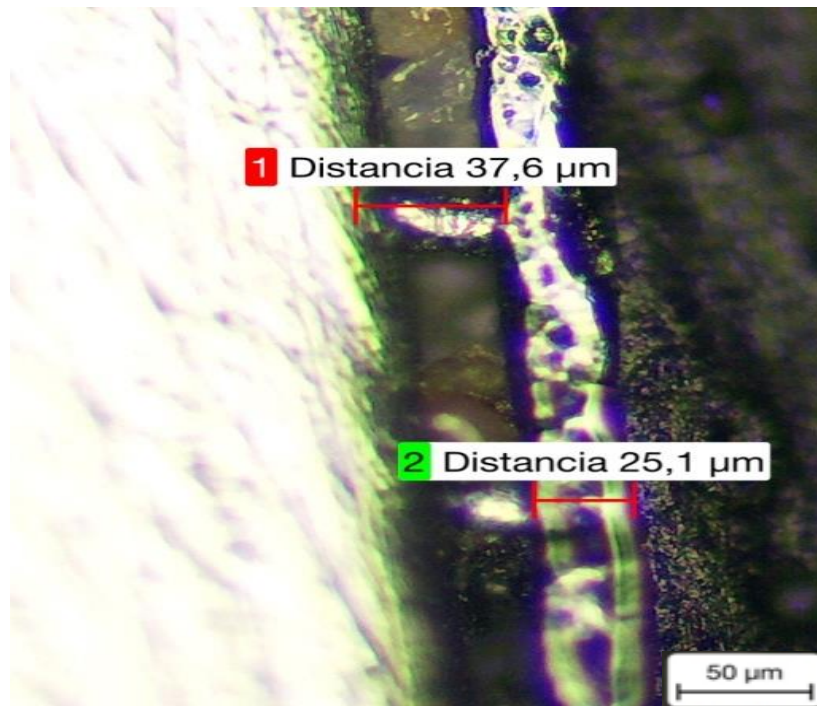


Ilustración 17: Probeta 10, 220 Ciclos, 500°C

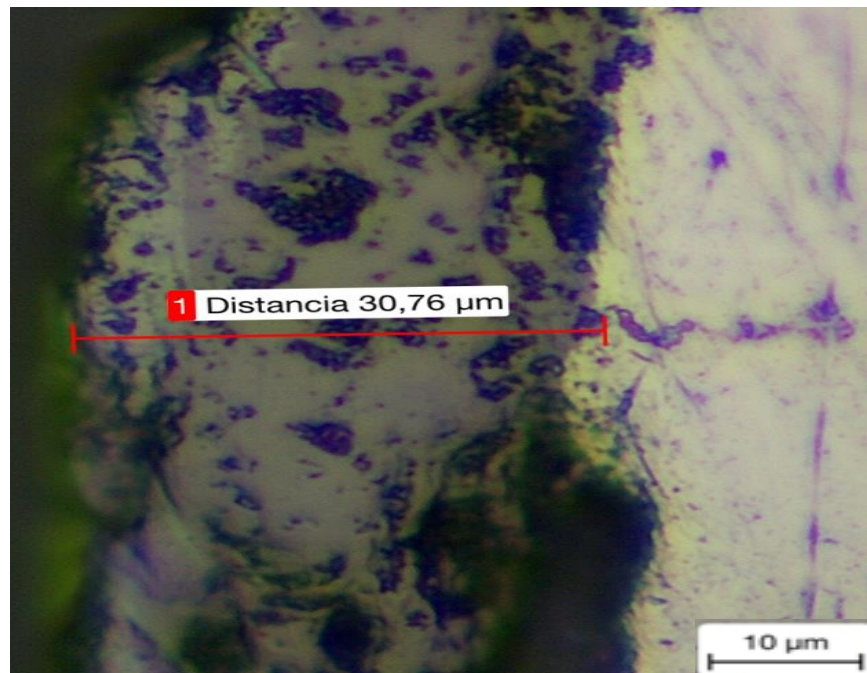


Ilustración 18: Probeta 11, 100 Ciclos, 500°C

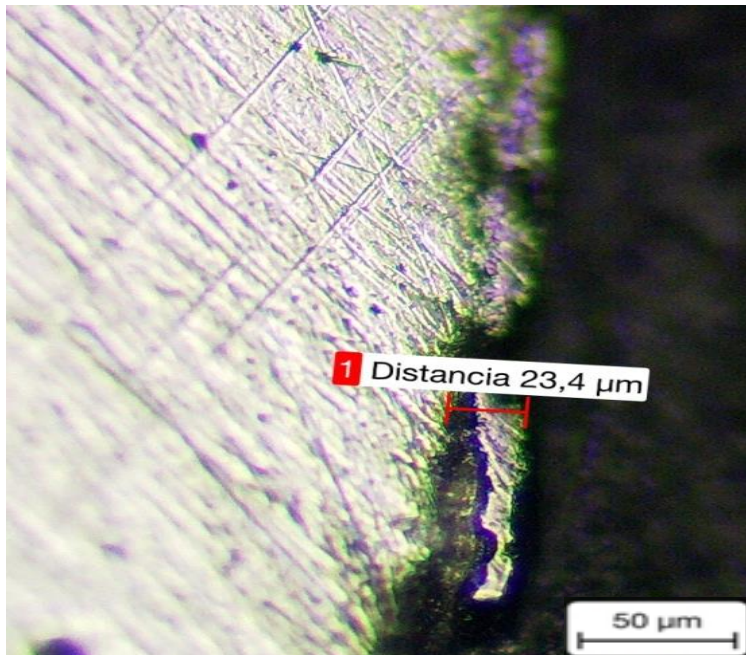
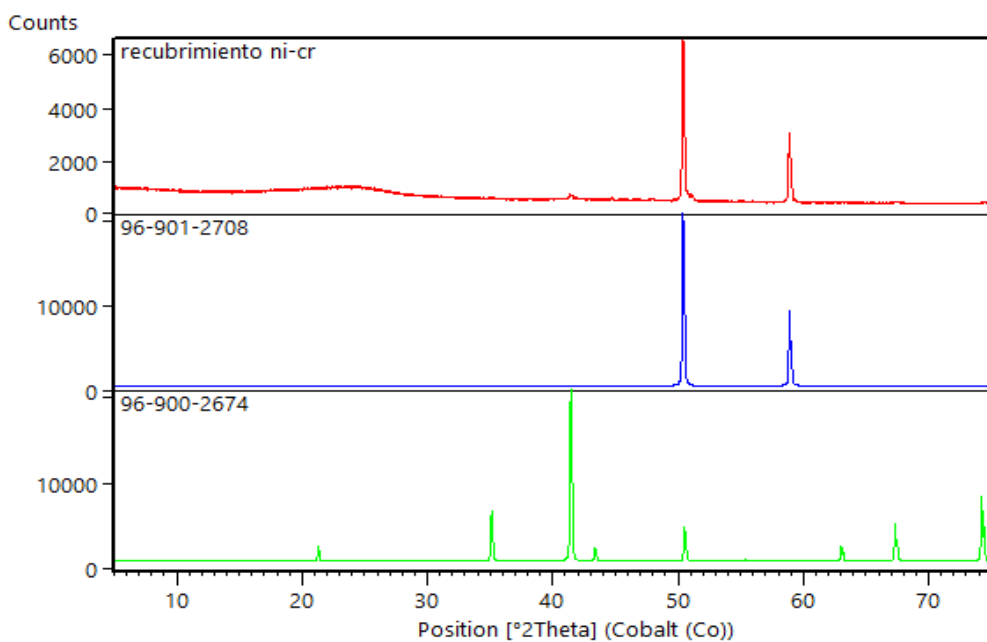
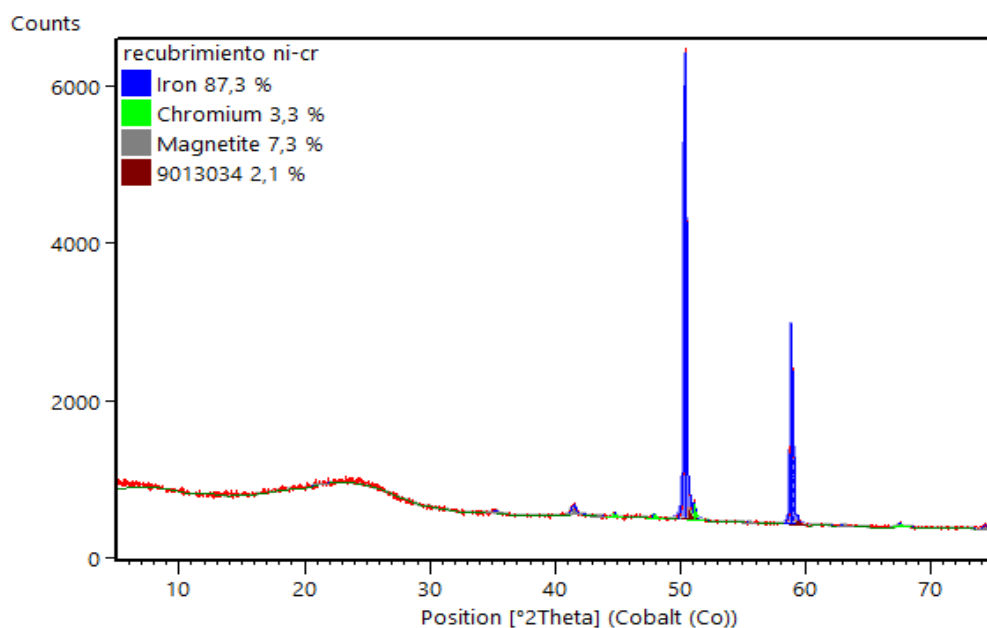


Ilustración 19: Probeta 12, 25 Ciclos, 500°C

El comportamiento de las probetas sin recubrimiento es el mismo, no es tan drástico como las sometidas a 600°C pero si se observan desprendimientos de las películas de óxidos y corrosión del substrato.

4.4 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Se enviaron 3 muestras a la universidad Tecnológica y Pedagógica de Tunja, las cuales eran una muestra recubierta a 0 ciclos, una muestra recubierta a 200 ciclos y 600°C y finalmente una muestra sin recubrimiento a 200 ciclos y 600°C; por inconvenientes ajenos a esta prueba solo se recibieron resultados de la probeta recubierta a 0 ciclos, los cuales se presentaran a continuación:



No.	Visi...	Ref. Code	Compound Na...	Crystal System	Chemical Formula	Score	Scale ...	Display Co...
1		96-901-2708	Iron	Cubic	Fe4.00	58	0,975	Blue
2		96-901-1575	Chromium	Hexagonal	Cr2.00	52	0,036	Lime
3		96-900-2674	Magnetite	Cubic	Fe24.00 O32.00	0	0,105	Gray
4		96-901-3035	9013034	Cubic	Ni4.00	57	0,056	Mar...

Ilustración 20: Informe DRX a probeta recubierta sin oxidación

Este informe da confirmación de lo analizado en las microscopias *SEM*, primero es recibido en el sustrato el níquel de la aleación y finalmente el cromo, pues el análisis superficial solo muestra cromo y hierro en su composición, además nos da la composición de los óxidos presentes en el espécimen.

Tabla 12. Resultados de composición de DRX

Probeta Recubierta Cr-Ni	
FeCr_2O_3	óxidos de cromo hierro
Probeta sin Recubrimiento A53	
Fe_2O_3	trióxido de dihierro
Fe_3O_4	Magnetita

4.5 RESULTADOS GENERALES

- 600°C, al ser una temperatura más drástica, evidencia mayores cambios de desgaste y ganancias de masas respecto a 500°C
- Se evidenció que al aplicar el recubrimiento Cr-Ni por el método de rociado térmico por arco, el níquel se adhiere primero a la superficie seguido de una mezcla Cr-Ni y finalmente una película de cromo.
- Para las probetas sin recubrimiento el análisis de masas es muy fluctuantes, puesto que las capas de óxidos de hierro se desprenden con facilidad acelerando la corrosión del material.

5. CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.

- El recubrimiento con Cr-Ni actuó como una barrera protectora contra la oxidación cíclica a altas temperaturas, esto se debe a que la capa del recubrimiento crea primero óxidos de cromo y de níquel antes de verse afectada la superficie del sustrato.
- La superficie del sustrato se vio levemente afectada por pequeñas capas de óxido, esto se debe a las porosidades que presenta el níquel luego de pasar los 150 ciclos de oxidación, pero estas capas de óxido no generan una corrosión considerable a comparación del material oxidado sin recubrimiento.
- El proceso de rociado térmico evidencia que las proporciones de aporte de material no son uniformes ni controladas, pues en ciertas probetas se evidencian capas con diferentes dimensiones y proporciones distintas de cromo y níquel.
- En los resultados se obtuvo un comportamiento para-lineal en el crecimiento de la capa de óxido, el crecimiento se observa de manera significativa a partir de los 50 ciclos.
- El acero ASTM A53 Grado B tiene un costo de \$450 Dólares por tonelada, el costo del recubrimiento es de \$150 Dólares por metro cuadrado, lo cual lo hace una propuesta considerable para la industria del manejo de fluidos a altas presiones y temperaturas
- Dado que la temperatura de trabajo de una caldera está entre 450°C y 500°C, con la aplicación del recubrimiento se pueden subir las temperaturas de trabajo sin arriesgar a corroer el material en tan corto tiempo, de lo contrario, se pueden trabajar a dichas temperaturas alargando el tiempo de recambio y mantenimientos del material.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Para la utilización del mecanismo de pruebas de oxidación cíclica, se recomienda leer el manual de uso antes de realizar las pruebas, además un correcto posicionamiento de este pues se puede presentar el caso de un corto y quemar la resistencia.
- El laboratorio de metalografía de la Universidad Tecnológica de Pereira tiene una alta demanda de análisis de composición, por lo que se hace necesario un microscopio electrónico de barrido para la Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Tener controlado el ambiente de almacenamiento de las probetas luego de que estas cumplan su ciclo en la prueba para evitar ganancia de óxidos distintos a los ganados en la prueba.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MARTINEZ Villafañe, CHACON Nava, GAONA Tiburcio, ALMERAYA Calderón, Gonzales Rodríguez, Oxidación a altas temperaturas, p.3.
- [2] Marulanda Arevalo, Jose Luddey. Tristanch Reyes, Jose Luis. Gonzales Betancourth, Hector Alvaro. Rociado térmico. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. 2015
- [3] J. Marulanda, A. Zapara, E. Isaza. Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico. Scientia et Technica. N° 34. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007
- [4] Mijangos, Carmen. Serafin Moya, Jose. Nuevos Materiales en la Sociedad del Siglo XXI. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España. 2007. Disponible en: <http://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/documentos/materiales.pdf>
- [5] J. Streeter. ASIMET. Ingenieria de superficies. Revista Metal industria. Disponible en: http://www.asimet.cl/ingenieria_superficies.htm
- [6] Praxair direc. Cored Wire Advantages. Disponible en: <http://www.praxairdirect.com/Industrial-Gas-and-Welding-Information-Center/Productivity-Solutions/advanced-powder-technology.html>
- [7] ARROYAVE ESPINOSA, LUIS MIGUEL & BASTIDAS MELO ARNOLD FRANCISCO. Diseño y construcción de un mecanismo para pruebas de oxidación cíclica en la Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica, 2016 (2016)
- [8] Al, George, High TEMPERATURE corrosion of engineering alloys: oxidation Ohio: ASM, 1990.p.15-43.
- [9] Primer Encuentro Nacional de corrosión y Protección. Universidad Antioquia (CESET grupo de corrosión), UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARARIANA (centro de investigación para el desarrollo integral), corrosión en sistemas en generación de vapor, Medellín 1991.p 1-6.

- [10] Primer Encuentro Nacional de corrosión y Protección. Universidad Antioquia (CESET grupo de corrosión), UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARARIANA (centro de investigación para el desarrollo integral), corrosión en sistemas en generación de vapor, Medellín 1991.p 1-6.
- [11] LIZCANO José Martín,ZABALA Eduardo.Evaluación de integridad y vida residual de caldera industriales.
- [12] SERNA José Aníbal, MERCHÁN, Rafael, AFANADORWilson, Aceros ferríticos.
- [13] GÓMEZ BARROSO, Carlos .Oxidación-carburación simultanea del acero ferríticos 9Cr-1Mo modificado grado p91,en ambientes con hidrocarburos a temperatura alta. Bucaramanga, 2002,p11-12,Trabajo de grado (M.Sc. Ingeniería Metalúrgica).
- [14] BUDYNAS, Richard G. NISBETT, J. Keith. Traducido por Jesús Murrieta y Efrén Alatorre. Diseño enIngeniería Mecánica de Shigley. 8 ed. México: McGraw-Hill, 2008. 1060p. ISBN-10 970-10-6404-6.
- [15]BRADFORD, Samuel,A,Fundamentals of Corrosion in gases. 9 ed.Ohio ASM, 1987, p.
- [16] CARBOLITE, Operating& Maintenance instruction, Imperial College of Science and Technology, London, serial 12/98/2826, 1998.
- [17] ASM Handbook. Properties and selection irons steels and high-performance alloys.1997.vol 1.
- [18] MACHUCA MARTINEZ,Jesús y BARRAZA RESTREPO,Harold. Oxidaciónisotérmica del acero a altas temperaturas.Bucaramanga,2002,p.22 Trabajo de grado.
- [19] Test method for continuous oxidation test elevated temperatures for metallic materials. Tokyo: JIS, 1993.
- [20] CARVAJAL Niño Yesid, Estudio cinético de la oxidación a alta temperatura del acero ferrítico.